INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de **SCIENTIFIC AMERICAN**



ORIGEN DE HOMINOIDEOS Y HOMINIDOS

Mayo 1984

350 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 92
Mayo 1984

INVESTIGACION Y CIENCIA *Edición en español de* SCIENTIFIC AMERICAN

Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

Rosa Martínez: *Un abismo dinámico*; Jacobo Cárdenas y Emilio Fernández: *Control genético de un comportamiento innato*; Jaime Truyols: *Origen de hominoideos y homínidos*; Amando García Rodríguez: *Materia excitónica*; Eugenia Pera Ramón: *Sonidos musculares*; Javier Niell: *Adaptabilidad del ratón doméstico*; Esteban Rodríguez Ocaña: *Florence Nightingale*; Luis Bou: *Juegos de ordenador*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio*.

Ciencia y sociedad:

Ramón Pascual: *La carrera de los físicos*

Libros:

Francesc Bujosa, Mariano Artigas, Domingo Fletcher y Miguel de Guzmán



LA PORTADA

La portada ilustra los cráneos, reconstruidos, de cuatro especies que han desempeñado un importante papel en la moderna interpretación de la evolución humana (véase "Origen de hominoideos y homínidos", por David Pilbeam, en este número). En la parte superior izquierda aparece *Proconsul africanus*, antropoide africano del Mioceno. Arriba, a la derecha, *Sivapithecus*, gran antropoide del Mioceno superior, conocido sobre todo a partir de los depósitos fosilíferos del sur del Himalaya; este género probablemente fuera el antepasado del orangután actual. Abajo, a la izquierda, se ofrece la especie de *Australopithecus* descubierta en Etiopía, *A. afarensis*. Abajo, a la derecha, la especie *Homo habilis*, recuperada en Kenia. Tanto *A. afarensis* como *H. habilis* precedieron a la forma mejor conocida, *Homo erectus*, especie africana de hace 1,6 millones de años que constituye el predecesor inmediato de *Homo sapiens*.

Suscripciones:
Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
Barcelona-29 (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 37

Condiciones de suscripción:
España:
Un año (12 números): 3.850 pesetas
Extranjero:
Un año (12 números): 52 U.S. $
Ejemplar atrasado ordinario:
350 pesetas
Ejemplar atrasado extraordinario:
450 pesetas

Distribución para España
Distribuciones de Enlace, S. A.
Ausias March, 49 - Barcelona-10

Distribución para los restantes países:
Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - Barcelona-29

Publicidad:
Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
Avda. de Moratalaz, 137 - Madrid-30
Tel. 430 84 81
Cataluña:
Lourdes Padrós
Manuel Girona, 61, 2.º - Barcelona-34
Teléfono 204 45 83

Controlado por O.J.D.

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Pintura de la portada de Enid Kotschnig

Página	Fuente
9	Jesús Gómez González
10-11	Juan Cotoner y J. Gómez González
12	J. Gómez González
13-14	Juan Cotoner y J. Gómez González
15-16	J. Gómez González
17-18	Juan Cotoner y J. Gómez González
21	Charles D. Hollister
22-23	Walken Graphics
24	Charles D. Hollister
25-32	Walken Graphics
35	Bunji Tagawa
36	Richard H. Scheller y Richard Axel
37	Richard H. Scheller y Richard Axel (*arriba*), Bunji Tagawa (*centro y abajo*)
39-40	Bunji Tagawa
42	Richard H. Scheller y Richard Axel
49	Enid Kotschnig
50-52	Tom Prentiss
53-56	Ilil Arbel
63	André Mysyrowicz, David P. Trauernicht y James P. Wolfe
64-65	Gabor Kiss
66	David P. Trauernicht, Universidad de Illinois en Urbana-Champaign
67	Paul L. Gourley y James P. Wolfe, Universidad de Illinois (*izquierda*); Gabor Kiss (*derecha*)
68-72	Gabor Kiss
75-82	Patricia J. Wynne
85-88	Alan D. Iselin
89	F. H. Bronson, Universidad de Texas en Austin (*arriba*); Alan D. Iselin (*abajo, izquierda*)
90-91	Alan D. Iselin
93	Thomas M. Pantages, cortesía de la biblioteca Houghton
94	Biblioteca Falk de Ciencias Médicas
96-98	Thomas M. Pantages, cortesía de la biblioteca Widener
103	Thomas M. Pantages; Norman Margolus, Tommaso Toffoli y Gérard Y. Vichniac
104-105	Ilil Arbel
106-107	Stephen Wolfram
108	Ilil Arbel
110	Thomas M. Pantages; Norman Margolus, Tommaso Toffoli y Gérard Y. Vichniac
113-117	Michael Goodman

ISSN 0210-136X
Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa
Pedro IV, 160 - Barcelona-5
Fotocromos reproducidos por GINSA, S.A.
Imprime GRAFESA
Gráfica Elzeviriana, S. A.
Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11
Barcelona-13
Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

JESUS GOMEZ GONZALEZ ("Génesis de los púlsares") dirige el Centro Astronómico de Yebes y codirige la Estación Radioastronómica IRAM-IGN de Pico Veleta, que está dotada con uno de los radiotelescopios de ondas milimétricas más modernos del mundo. Cursó la carrera de físicas en la Universidad Complutense de Madrid, en cuyo centro superior ha sido profesor de radioastronomía. Pertenece al Cuerpo Nacional de Astrónomos. Ha realizado trabajos de investigación en temas tan diversos como el medio interestelar, los púlsares, la emisión radioeléctrica del Sol o la instrumentación astronómica a longitudes de onda milimétricas. Es miembro de la Unión Astronómica Internacional, de la Comisión Nacional de Astronomía, del Consejo Científico del Instituto francoalemán de Radioastronomía milimétrica y vocal de radioastronomía del Comité Nacional de la Unión Radiocientífica Internacional.

CHARLES D. HOLLISTER, ARTHUR R. M. NOWELL y PETER A. JUMARS ("Un abismo dinámico") son oceanógrafos interesados por la geología y biología de las profundidades marinas. Hollister es el decano de estudios de graduación de la Institución Oceanográfica Woods Hole. Licenciado por la Universidad estatal de Oregon, trabajó luego en el observatorio geológico Lamont-Doherty, de la Universidad de Columbia, por la que se recibió de doctor en 1967. En su tesis se abordaban por primera vez los efectos geológicos de las corrientes de fondo de las profundidades oceánicas, región considerada, hasta entonces, de calma. Nowell es profesor adjunto de la Escuela de Oceanografía de la Universidad de Washington e investigador visitante en Woods Hole. Educado en el Trinity College de Cambridge, es doctor por la Universidad de Columbia Británica. Jumars enseña oceanografía en la Universidad de Washington. De origen alemán, cursó la licenciatura en la Universidad de Delaware y se doctoró por la Institución Scripps de Oceanografía. Su trabajo en el mar presenta una importante componente biológica: investiga en el campo de la interacción entre los organismos bentónicos y los procesos sedimentarios.

RICHARD H. SCHELLER y RICHARD AXEL ("Control genético de un comportamiento innato") son, respectivamente, profesor adjunto de biología de la Universidad de Stanford y catedrático de patología y bioquímica de la Facultad de Medicina y Cirugía de la Universidad de Columbia. Tras licenciarse por la Universidad de Wisconsin en Madison, Scheller se trasladó al Instituto de Tecnología de California, por el que se doctoró en 1980. En 1980 y 1981 trabajó como becario postdoctoral en los laboratorios de Axel y Eric Kandel, en Columbia. Axel se formó en el Columbia College y la Facultad de Medicina de la Johns Hopkins. Se incorporó al claustro de Columbia en 1972. Su línea principal de investigaciones ha sido la del desarrollo de técnicas universales de transferencia de genes entre cualquier tipo de células, prácticamente.

DAVID PILBEAM ("Origen de hominoideos y homínidos") es profesor de antropología de la Universidad de Harvard. Tras acabar su carrera en la de Cambridge, siguió en ésta como ayudante de antropología. Se recibió de doctor, en 1967, por la de Yale, incorporándose a la misma como profesor al año siguiente. En 1981 se trasladó a Harvard. Escribe Pilbeam: "Me atraen los estudios de la evolución humana porque le exigen a uno tener algo de historiador y de filósofo. Estoy muy interesado en el juego de relaciones entre 'hechos' y 'teorías', en ahondar sobre la procedencia de nuestras teorías establecidas".

ANDRE MYSYROWICZ y JAMES P. WOLF ("Materia excitónica"). Es el primero físico adscrito al Centro Nacional francés de Investigación Científica (CNRS). Se ocupa de los efectos ópticos en materiales semiconductores, tema que le ha interesado desde que se recibió de doctor por la Universidad de Estrasburgo, en 1968, y sobre el cual versaba su tesis. Wolf enseña en la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign. Educado en Berkeley, trabajó en esa institución hasta 1981, cuando se incorporó a Illinois. Le interesan los fenómenos de transporte de fonones y excitones en el interior de los cristales.

GERALD OSTER ("Sonidos musculares") enseña biofísica en la Facultad de Medicina Mount Sinai de la Universidad de Nueva York. Se licenció en ciencias por la Universidad de Brown, en 1940, doctorándose en bioquímica, en 1943, por la de Cornell. Investigó luego en el Instituto de Tecnología de Massachusetts y en la Universidad de Princeton; en 1945 se trasladó al Instituto Rockefeller. Becado por la Fundación Rockefeller de Londres, trabajó en el Birkbeck College y la Royal Institution, en 1949 y 1950, prosiguiendo estudios en las Universidades de Estrasburgo y París. En 1952 se incorporó al que es hoy Instituto Politécnico de Nueva York, donde enseñó química polimérica hasta su traslado al Mount Sinai, en 1969. Oster trabaja también en sus plantaciones experimentales del Caribe, a la búsqueda de soluciones a los problemas agrícolas de los países del tercer mundo.

F. H. BRONSON ("Adaptabilidad del ratón doméstico") profesa zoología en la Universidad de Texas en Austin. Se formó en la estatal de Kansas y en la de Pennsylvania. Desde 1961 hasta 1968 estuvo adscrito al personal científico del laboratorio Jackson de Bar Harbor, Maine, donde le interesó por primera vez el ratón doméstico. Reside en Texas desde 1968. "Me describiría, comenta, como fisiólogo atento, en sentido amplio, al control ambiental de la reproducción de los mamíferos".

I. BERNARD COHEN ("Florence Nightingale") detenta la cátedra Victor S. Thomas de historia de la ciencia de la Universidad de Harvard. Desde el comienzo de sus estudios superiores, en 1933, ha permanecido ligado a ese centro, salvo un período de tres años como investigador becado en la Carnegie Institution de Washington. Se licenció en ciencias en 1937 y obtuvo el doctorado, el primero concedido en historia de la ciencia, en 1947; ha sido profesor de dicha disciplina desde 1959. Igualmente ha sido director de *Isis*, la revista trimestral que edita la Sociedad de Historia de la Ciencia, así como presidente de esa agrupación. A lo largo de los años se ha interesado principalmente por la actividad científica de Isaac Newton y de Benjamin Franklin; el primero de sus 17 artículos publicados en SCIENTIFIC AMERICAN, en agosto de 1948, se titulaba precisamente "En defensa de Benjamin Franklin". Recientemente concluyó un estudio histórico y analítico sobre las revoluciones científicas. Trabaja en la investigación de las influencias mutuas que, a lo largo de la historia, han mantenido las ciencias naturales y exactas con las ciencias sociales.

Hace…

José M.ª López Piñero

… doscientos años

José Masdevall Terrades publicó su *Dictamen dado de orden del rey sobre si las fábricas de algodón y lana son perniciosas o no a la salud pública de las ciudades donde estén establecidas.*

Nacido en la ciudad gerundense de Figueras, hacia 1730, y muerto en 1801, Masdevall fue una personalidad destacada de la medicina española de la Ilustración. Estudió en la Universidad de Cervera y fue médico de Carlos III y Carlos IV, inspector de epidemias del Principado de Cataluña y miembro de varias academias científicas nacionales y extranjeras. Alcanzó notable fama europea, en especial por su actividad en diferentes epidemias de "calenturas pútridas malignas" (fiebre tifoidea) y por la invención de un remedio antimonial para las mismas. Su libro titulado *Relación de las epidemias de calenturas pútridas y malignas que en estos últimos años se han padecido en el principado de Cataluña... con el método feliz, pronto y seguro de curar semejantes enfermedades* (1785), aparecido por vez primera en Barcelona, fue reeditado dos veces (1786 y 1787) en castellano en la Imprenta Real, de Madrid, y tuvo después dos ediciones en italiano y una en alemán. Juan Riera ha destacado la aportación de Masdevall a la clínica y epidemiología de las "calenturas pútridas" de Cataluña y Aragón de 1783, situando en primer plano, aparte de su estudio sobre el desarrollo de la epidemia, su descripción clínica, que considera "la mejor que de la fiebre tifoidea poseemos de autor peninsular del Setecientos": "Empezaba la calentura –dice Masdevall– por un frío sensible, siguiéndose un calor intenso que se disipaba por un calor excesivo, que disminuía notablemente todos los síntomas; sobrevenía después otro crecimiento con frío y mucho calor que se terminaba por los mismos sudores, lo que duraba de cinco a seis días... todo con notable cansancio y mucha postración de fuerzas; de modo que, a pocos días, no tenían vigor los enfermos para manejarse ni levantarse los miembros, se quexaban de un dolor intenso en el espinazo y riñones, y de una fuerte opresión en la boca del estómago, acompañada con unos vómitos de unas aguas amargas y amarillas. El dolor de cabeza era muy intenso, la sed muy considerable...; se observaba en dichos enfermos mucha dificultad en respirar, a muchos se les abultaba el abdomen... insensiblemente caía en un letargo; perdía el uso de la razón y, aunque respondiese adecuadamente a algunas preguntas, pronunciaba de tanto en tanto algunas palabras desconcertadas y sin la menor conexión... y moría el enfermo en el catorce de su enfermedad; otras veces, estos últimos accidentes sobrevenían más prontamente como del siete al nueve, en el que también murieron del mismo modo muchos enfermos; en otras ocasiones, fue este mismo curso de enfermedad más lento, y murieron otros diferentes desde el diez y siete al veinte y uno... La lengua... a proporción que la enfermedad se adelantaba, se ponía seca, inflamada y llena de hendedura, y algunas veces la vi con una vejiga o ampolla negra en su punta, cuya circunstancia indica siempre mucha malignidad..., dientes se cubrían de un lodo negro y pegajoso, y el cuerpo de varias manchas de distintos colores, o bien se observaban en diferentes de sus partes unas magulladuras semejantes a las que tienen los que han recibido unos fuertes latigazos en su persona. Otros enfermos, en el instante que les entraba la enfermedad, se veían acometidos de una calentura vehementísima con delirio, petequias o manchas de distintos colores, explicados arriba... En algunos se presentó la epidemia con unos dolores laterales, que diferentes médicos, creyendo que ya no era la misma enfermedad, quisieron tratar a esta especie de enfermos como acometidos de unos dolores pleuríticos inflamatorios... Estos son los dolores de costado o pleuresías pútridas y biliosas".

El remedio de Masdevall, compuesto por sales de amoníaco, ajenjo, tártaro emético y quina, motivó una enconada polémica. Fue el resultado de sus trabajos químicos de laboratorio e intentó basarlo en supuestos terapéuticos radicalmente opuestos a los tradicionales.

El *Dictamen* en torno a la relación entre las fábricas textiles y la salud pública lo redactó, al parecer, Masdevall a petición de la Real Junta de Sanidad. Su objetivo principal es demostrar que tales fábricas no son peligrosas, dada la inocuidad de los productos empleados y la de sus desechos. De pasada, ofrece información acerca de la industria textil catalana, de la condición de los obreros que en ella trabajan y de las repercusiones económicas generales de la misma. La mentalidad de la exposición es la de una ardiente defensa de la industria frente a la agricultura como progreso económico y social; a ello va unida una falta de sensibilidad casi absoluta para ver y testimoniar las condiciones de la vida de los proletarios.

Las industrias de las que habla son principalmente fábricas de algodón. Afirma que "en la villa de Olot son muchas las fábricas de estos tintes..." y que "se ha introducido y extendido mucho la hilanza de algodón entre los moradores de Cervera, como en otros parajes del Principado..."; un poco más adelante, habla de los "diferentes talleres de las fábricas de indianas de la Ciudad de Barcelona...". En cambio, según su testimonio, la industria lanera catalana apenas había comenzado entonces su existencia; habla sólo de dos fábricas de lana en Barcelona e informa de que trabajan muy poco.

Tal como hemos dicho, todo este desarrollo industrial le parece al médico catalán la mejor garantía de progreso económico y social. En varias ocasiones lo contrapone a la azarosa situación exclusivamente asentada sobre la agricultura: "Entre las muchas causas que produjeron aquellas tan terribles y ejecutivas enfermedades debía numerarse la miseria que por diferentes años seguidos han padecido los moradores del Llano de Urgel y de Sagarra, con motivo de las malas cosechas que últimamente se han tenido en aquellos territorios... Las malas cosechas han sido las mismas para los habitantes de Cervera..., pero no sintieron ni sienten actualmente... tanto la miseria los de Cervera como los de dichos pueblos... La razón es clara: se ha introducido y extendido mucho la hilanza de algodón entre los moradores de Cervera...". Y poco más tarde insiste en esa contraposición: "Me ha admirado la mucha cantidad de dinero que entra en dicha ciudad (Cervera) diariamente por razón de dicha hilanza. En realidad, a no haber sido por ésta y sus productos, era preciso que hubieran abandonado a Cervera y salido de ella muchas gentes por razón de la miseria que les hubieran ocasionado tantas y tan seguidas malas cosechas". Su fe en el desarrollo industrial es tal que no duda en afirmar que "seríamos el objeto de mofa y escarnio de las naciones cultas de la Europa si cayésemos en semejantes errores" (creer que las fábricas de lanas y algodón son un peligro para la salud pública).

Tanta admiración ante esta forma de progreso tiene que influir en su insensibilidad para captar las dificultades que ello entrañaba –y sobre todo iba a entrañar– para las condiciones de vida de la población obrera. Puede quizá tenerse en cuenta que las circunstancias no

era aún las que serían denunciadas medio siglo más tarde, pero aun así resulta irritante su visión optimista a ultranza acerca del estado sanitario de los trabajadores: "Habiendo tratado, conocido y reflexionado la contextura, facciones y disposición temperamental de varios hombres que en diferentes fábricas de Barcelona hacen dichos compuestos (los tintes para los tejidos de lana) a todos los he encontrado muy sanos, fuertes, robustos y con un semblante que demuestra estar aquellos hombres enteramente libres de toda disposición morbosa"; y en otro lugar: "Lo mismo que tengo dicho haber observado de los que manejan los tintes de los tejidos de lana, tengo verificado de los operarios y jornaleros que trabajan en las fábricas de indianas; la gente más lista, más robusta y menos enfermiza de Barcelona son estos operarios. He entrado varias veces en las referidas fábricas, he mirado muy de propósito el semblante de las facciones de aquellas gentes, que de todas edades se encuentran en ellas, y a todas las he visto con buenos colores, con buen semblante y, en lo general, mucho mejores y con un aire más fuerte y robusto que los demás habitantes de Barcelona".

Tampoco las condiciones higiénicas de las fábricas parecen plantear a Masdevall problemas de gravedad: "No tiene la menor duda que el aliento y la transpiración de muchos hombres encerrados en una pieza en que no se ventila ni renueva el ambiente infecta en poco tiempo aquella atmósfera y la corrompen de modo que la disponen a ocasionar varias enfermedades en los sujetos que viven en ellos –comienza diciendo–. He visto y recapacitado con la mayor reflexión diferentes talleres de las fábricas de indianas de la ciudad de Barcelona y he observado en todos ellos gran número de ventanas, las que, abiertas de tanto en tanto..., renovarán y purificarán el ambiente... y todo esto se conseguirá sin necesitar otro ventilador que el abrir dichas ventanas." Tan optimista visión incluye asimismo una valoración positiva del nivel económico de los obreros: "Estos hombres y los de menos edad que están empleados en dichas fábricas, todos ganan un buen jornal, con cuyo motivo comen y beben bien y están contentos y alegres...". Pero lo más inaceptable es su insensibilidad ante el trabajo infantil, al que alude en numerosas ocasiones.

(1)

DICTAMEN

DEL MISMO DOCTOR

DON JOSEPH MASDEVALL,

DADO DE ÓRDEN DEL REY

SOBRE

SI LAS FÁBRICAS DE ALGODON Y LANA SON PERNICIOSAS Ó NO Á LA SALUD PÚBLICA DE LAS CIUDADES DONDE ESTAN ESTABLECIDAS.

Para averiguar y saber si las Fábricas de algodon y lana son perniosas á la salud pública, y si causan enfermedades en las Ciudades en que se establecen, cargando la atmósfera de vapores venenosos y corruptos que se eleven principalmente de sus tintes, del cúmulo de gentes que se juntan en sus talleres, y de otras diferentes causas; es preciso hacer primeramente una narrativa de los principales ingredientes de que se sirven los Fabricantes y Pintadores de las mismas, para dar á sus texidos los diferentes colores con que los hermosean.

A Los

RELACION

DE LAS EPIDEMIAS

DE CALENTURAS

PÚTRIDAS Y MALIGNAS,

que en estos últimos años se han padecido en el Principado de Cataluña; y principalmente de la que se descubrió el año pasado de 1783 en la Ciudad de Lérida, Llano de Urgél y otros muchos Corregimientos y Partidos, con el método felíz, pronto y seguro de curar semejantes enfermedades.

POR DON JOSEPH MASDEVALL, Doctor en Medicina de la Universidad de Cervera, Médico del Rey nuestro Señor con exercicio, Inspector de Epidemias del Principado de Cataluña, Sócio del Real Colegio de Médicos y Cirujanos de Zaragoza, y de la Real Sociedad de Medicina de Paris.



DE ÓRDEN SUPERIOR.

EN LA IMPRENTA REAL.

1786.

1. Primera página del Dictamen *de José Masdevall en torno a la relación entre las fábricas textiles y la salud pública. Es una ardiente defensa de la industria frente a la agricultura como progreso económico y social, con notable insensibilidad para las condiciones de vida de los proletarios. 2. Portada de la* Relación *que José Masdevall dedicó principalmente a la epidemia de fiebre tifoidea padecida en Cataluña en 1783.*

Génesis de los púlsares

Diecisiete años después de su descubrimiento, la génesis de los púlsares continúa siendo objeto de intensas investigaciones, aunque su formación en explosiones de supernova empieza a disponer de una mayor base experimental y teórica

Jesús Gómez González

En el proceso general de continua transformación de la materia, las estrellas nacen, viven y mueren. Los púlsares son estrellas de neutrones, y, como cualquier estrella, nacen, viven y mueren. Una estrella es un masa esférica en estado gaseoso (aunque a densidades y temperaturas muy elevadas), sujeta por su propia atracción gravitatoria. ¿Cómo se establece entonces el equilibrio que la impide colapsar? Consideremos una delgada capa cualquiera del interior de la estrella. Sobre ella se estará ejerciendo la presión hidrostática causada por el peso (atracción gravitatoria) de las capas más externas. Sin embargo, dicha capa no se comprime, simplemente porque en su interior la temperatura es tal que la presión interna correspondiente compensa la presión ejercida por el peso de las capas externas. Así pues, cuanto más hacia el interior se encuentre la capa considerada, mayor será la presión externa ejercida; por tanto, al tener que ser mayor la presión interna que la compense, también será mayor su temperatura. Por ello, mientras en las capas externas de una estrella la temperatura se mide en miles de grados, en sus capas internas ha de medirse en millones de grados.

Si se encuentran en esta situación de equilibrio, ¿por qué evolucionan las estrellas? Para responder a esta pregunta volvamos de nuevo a la delgada capa interior. La agitación térmica de sus partículas genera en ella una energía radiante en forma de fotones, que se propagan a las capas adyacentes donde son absorbidos y reemitidos. Y así, tras millones de absorciones y reemisiones, parte de esa energía alcanza la superficie y escapa de la estrella constituyendo la radiación que observamos desde la Tierra. Para las capas más externas, la energía radiante que reciben de las regiones del interior (absorciones) se corresponde con la energía que reemiten, de suerte que este proceso prácticamente no cuenta en el balance energético de dichas capas. Por el contrario, en las regiones situadas en las capas profundas de la estrella, la energía radiante absorbida es menor que la emitida.

¿De dónde sale entonces esta diferencia de energía radiante? Dos son las posibilidades: a expensas de la energía térmica (cinética) de las partículas del gas o a expensas de las reacciones nucleares que se producen entre las mismas. En el primer caso, el gas de la capa se enfría; disminuye entonces la presión interna y la capa en cuestión se comprime. Al comprimirse, aumenta de nuevo su temperatura y, con ella, la presión interna, hasta que vuelve a compensar la presión exterior. Este proceso se realiza de una forma continua y constante; y va cambiando la estructura de la estrella. Vemos además que, cuando actúa este proceso, la energía radiada procede en último extremo de la energía potencial gravitatoria de la estrella.

Las reacciones nucleares se producen cuando el gas alcanza temperaturas de millones de grados. Así pues, este segundo proceso sólo tiene lugar en las capas más profundas de la estrella. Las reacciones de este tipo son muy eficientes en la generación de energía, esto es, pequeñas cantidades de materia producen cantidades ingentes de energía. En las capas profundas de la estrella los cambios se desarrollan con extremada lentitud (millones de años), ya que, para compensar la diferencia entre la energía radiada y la absorbida en un volumen dado, se requiere la transmutación atómica de una fracción insignificante de la masa encerrada dentro del mismo. Si partimos de un material estelar compuesto fundamentalmente de hidrógeno (que es el elemento más abundante en el gas interestelar y que, al condensarse, forma las estrellas), las primeras reacciones nucleares en ocurrir se producen entre núcleos de hidrógeno para constituir núcleos de helio. Cuando los átomos de hidrógeno se agotan, opera el proceso de contracción gravitatoria, hasta que se alcanzan las densidades y temperaturas que permiten la puesta en marcha de reacciones nucleares entre los núcleos de helio para formar núcleos más pesados de carbono, oxígeno, nitrógeno, etcétera. Así, en cada capa del interior de la estrella se realiza esta alternancia de procesos de producción de energía a través de la acción gravitatoria y de las reacciones nucleares de fusión entre núcleos atómicos cada vez más pesados.

Si hubiéramos de resumir la evolución de una estrella típica, diríamos que procede aumentando su densidad y temperatura, así como cambiando su composición química al generar núcleos pesados a partir de otros más ligeros (sobre todo en sus zonas internas).

En todo momento, la estrella se ajusta a una situación de equilibrio. A las fuerzas de presión hidrostática se le oponen unas fuerzas de presión interna que dependen de las condiciones físicas y químicas existentes en cada punto de la estrella. El estudio de la estructura y evolución de las estrellas conduce a problemas como el del establecimiento de las relaciones entre la densidad, presión y temperatura del gas (ecuaciones de estado de la materia) para valores extremos de estos parámetros. Esta fue, sin duda, la cuestión que, a principios de los años treinta, indujo a varios astrofísicos teóricos a especular sobre la estabilidad de las estrellas con densidades comparables a la densidad de los núcleos atómicos, esto es, densidades del orden de los diez billones de gramos por centímetro cúbico. Astrónomos, como Frank Zwiky y Walter Baade, y físicos, como Lev Landau y Robert Oppenheimer, establecieron la posibilidad teórica de la existencia de estrellas con densidades de ese tenor, en las que la materia se encontraría fundamental-

mente en forma de neutrones, razón por la que se vinieron a llamar estrellas de neutrones.

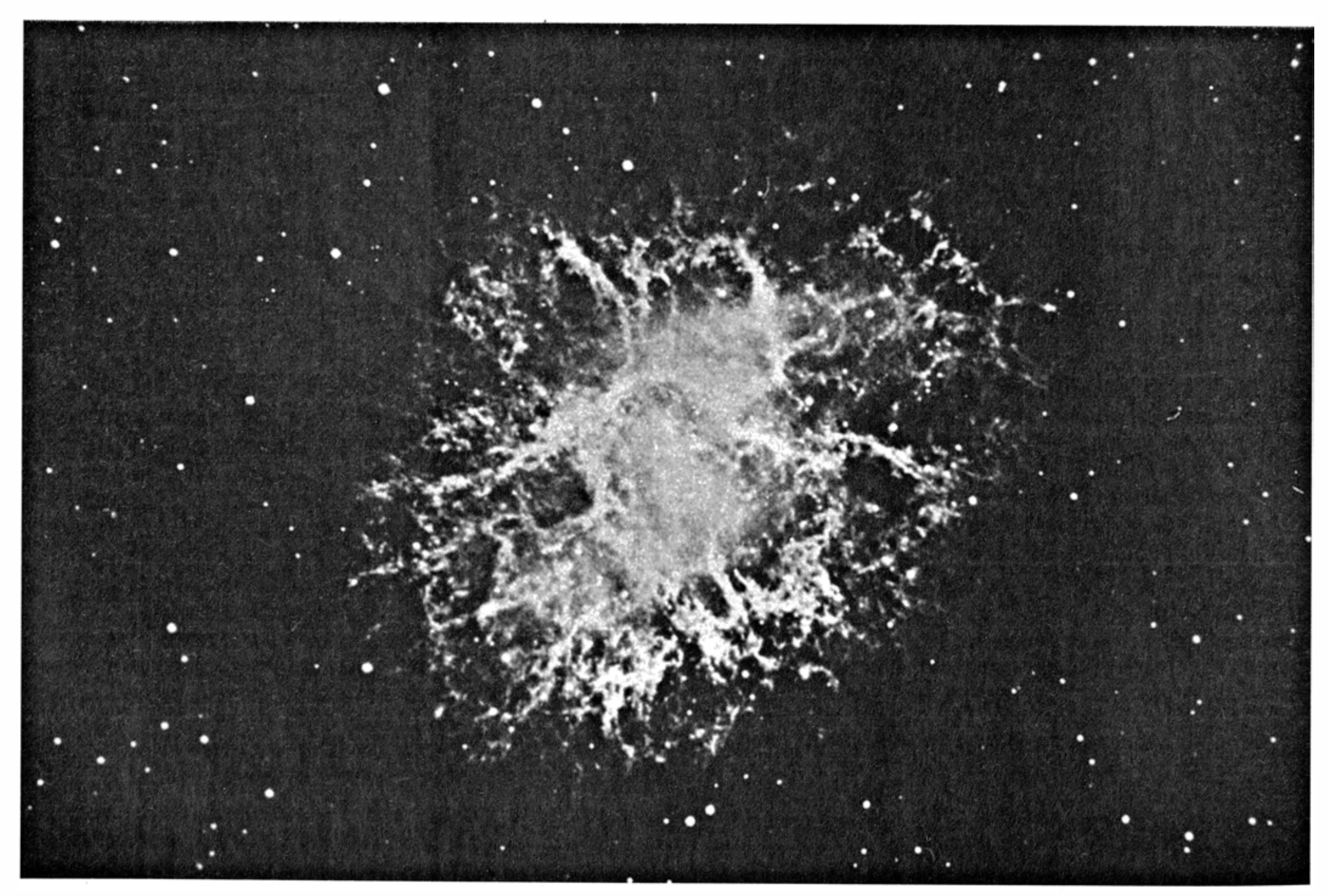
La existencia real de este tipo de estrellas quedó por entonces en el terreno de la especulación, como sería hoy el del estudio de los agujeros negros, por ejemplo. Mas, a comienzos de la década de los treinta, un físico norteamericano, Karl Jansky, detectaba por primera vez la emisión radioeléctrica procedente de un objeto astronómico: la emisión de fondo de la galaxia. Sentaba así las bases de una nueva rama de la astronomía, la radioastronomía, llamada a realizar en los años siguientes descubrimientos fundamentales en el conocimiento del cosmos. Uno de estos descubrimientos sería el de las estrellas de neutrones.

Durante la segunda mitad de la década de los sesenta, el grupo de radioastronomía de la Universidad de Cambridge, que dirigía el profesor Anthony Hewish, se encontraba realizando un estudio sistemático del centelleo interplanetario de radiofuentes. Se trata de un fenómeno análogo al centelleo de la luz de las estrellas que se produce a causa de las fluctuaciones en la densidad de las capas atmosféricas. En el caso de las radiofuentes, las fluctuaciones de la intensidad de la radiación recibida se deben a las irregularidades en la distribución del plasma (gas ionizado) interplanetario, eyectado por el Sol, y que constituye el llamado viento solar.

Los tiempos característicos de estas variaciones de intensidad son del orden del segundo. Por ello, los equipos destinados a la observación de este fenómeno estaban especialmente diseñados para responder a variaciones rápidas de intensidad, hecho éste que, salvo en el caso de algunas radiaciones solares, no cabía esperarse en ningún otro tipo de radiofuentes. Además, dicho equipo trabajaba a la frecuencia de 81 megahertz, que es una frecuencia baja dentro de las utilizadas en los observatorios radioastronómicos, pero que resultaba particularmente adecuada para el estudio del centelleo interplanetario. Estas dos características del equipo utilizado por los radioastrónomos de Cambridge permitieron la detección de la emisión radioeléctrica producida por estrellas de neutrones.

A finales de 1967, en el curso de una sesión de observación, Jocelyn Bell, estudiante postgraduada del grupo del profesor Hewish, comprobó que en sus registros gráficos aparecían unas débiles señales separadas por intervalos regulares de tiempo de 1,3 segundos. No es rara la aparición de señales extrañas debidas a interferencias o a inestabilidades en los equipos receptores usados en radioastronomía. La sagacidad de Bell, como en otros casos similares de descubrimientos científicos, estuvo en no desechar sin más aquellas observaciones. Y así, el análisis cuidadoso y repetición de aquellas observaciones llevó al grupo de radioastrónomos de Cambridge a establecer que tales emisiones procedían de un objeto astronómico de naturaleza hasta entonces desconocida, situado en algún punto de nuestra galaxia. Pronto se descubrieron varios otros, denominándoseles púlsares (contracción de "pulsating radio source", radiofuente pulsante).

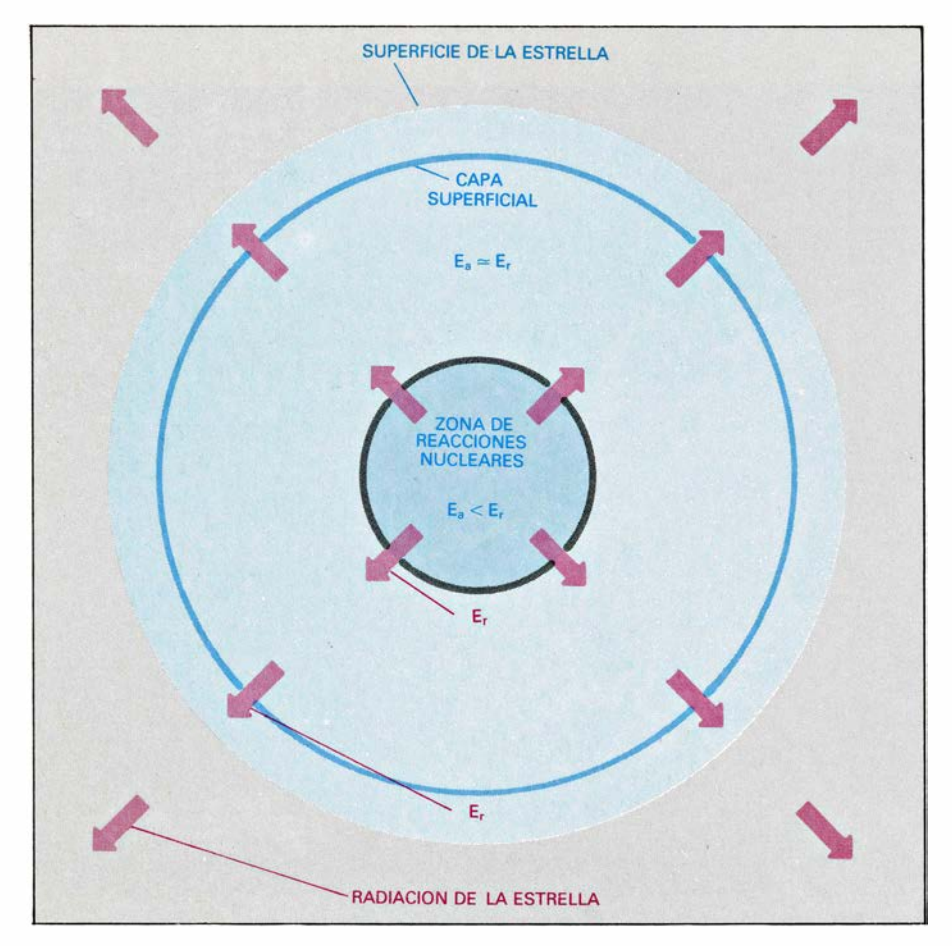
¿Cuál podía ser la naturaleza de estos nuevos objetos astronómicos? La



1. NEBULOSA DEL CANGREJO, resto de la explosión de supernova que tuvo lugar en el año 1054 de nuestra era en la constelación del Toro. Sus filamentos se expanden hacia el espacio interestelar a velocidades de decenas de miles de kilómetros por segundo. En la parte central de la misma se encuentra un púlsar (PSR 0531+21) de un período de 33 milisegundos. Sus impulsos se han detectado en un rango de frecuencias que va desde las ondas de radio hasta los rayos X y gamma. El púlsar y el resto de supernova constituyen el más claro ejemplo de asociación entre ambas clases de objetos.

caracterísica observacional más notable de estas fuentes era, evidentemente, su emisión por impulsos de período tan corto y con tan sorprendente regularidad. Para explicar la naturaleza de los púlsares, se barajaron varias hipótesis basadas en fenómenos astronómicos conocidos. Se pensó en oscilaciones de estrellas enanas blancas, en orbitación de estrellas o planetas muy próximos que modulasen la emisión de otra estrella, etcétera. Pero ninguno de estos modelos podía dar cuenta de períodos tan cortos y regulares como los que mostraba la emisión de los púlsares. Y hubo que apelar a objetos de naturaleza distinta de los conocidos. La extraordinaria regularidad de los impulsos favorecía los modelos basados en la rotación del objeto emisor. La brevedad de sus períodos imponía entonces que se tratase de un objeto pequeño y masivo. La hipótesis de que los púlsares pudieran ser las famosas estrellas de neutrones se presentó así de una forma natural.

Poco a poco, el volumen de datos experimentales fue creciendo. Se comprobó, por ejemplo, que la intensidad de la radiación emitida disminuía rápidamente al aumentar la frecuencia de observación. (Por ello, si la instrumentación utilizada para el estudio del centelleo interplanetario hubiese trabajado a frecuencias más altas, la intensidad de los impulsos habría sido mucho menor y probablemente habrían pasado desapercibidos.) Ese tipo de espectro –variación de la intensidad con la frecuencia– es muy común en el universo; se observa en el Sol, en planetas (Júpiter) y hasta en radiogalaxias o en quásares, que son, estos últimos, los objetos astronómicos más lejanos y más energéticos de que se tenga noticia. La emisión de este tipo se genera por electrones que se mueven a velocidades muy próximas a la de la luz, siguiendo trayectorias helicoidales en torno a campos magnéticos. La emisión así producida está polarizada, esto es, los campos eléctricos (o magnéticos) de la onda vibran preferentemente en un plano. También esta característica se observó en la emisión de los púlsares.



2. CAPAS DE UNA ESTRELLA. En las capas profundas, la presión hidrostática ejercida por el peso del material estelar situado sobre ellas se soporta gracias a las elevadas temperaturas (grandes presiones internas) reinantes en dichas capas. A esas temperaturas (millones de grados) se producen las reacciones nucleares de fusión que generan la energía radiada (*Er*) por la estrella y que van cambiando la composición química de la misma. La evolución general de una estrella se realiza en el sentido de ir aumentando su densidad y temperatura, así como de ir cambiando su composición química al generar núcleos pesados a partir de otros más ligeros (sobre todo en sus zonas más internas). *Ea* simboliza la energía absorbida.

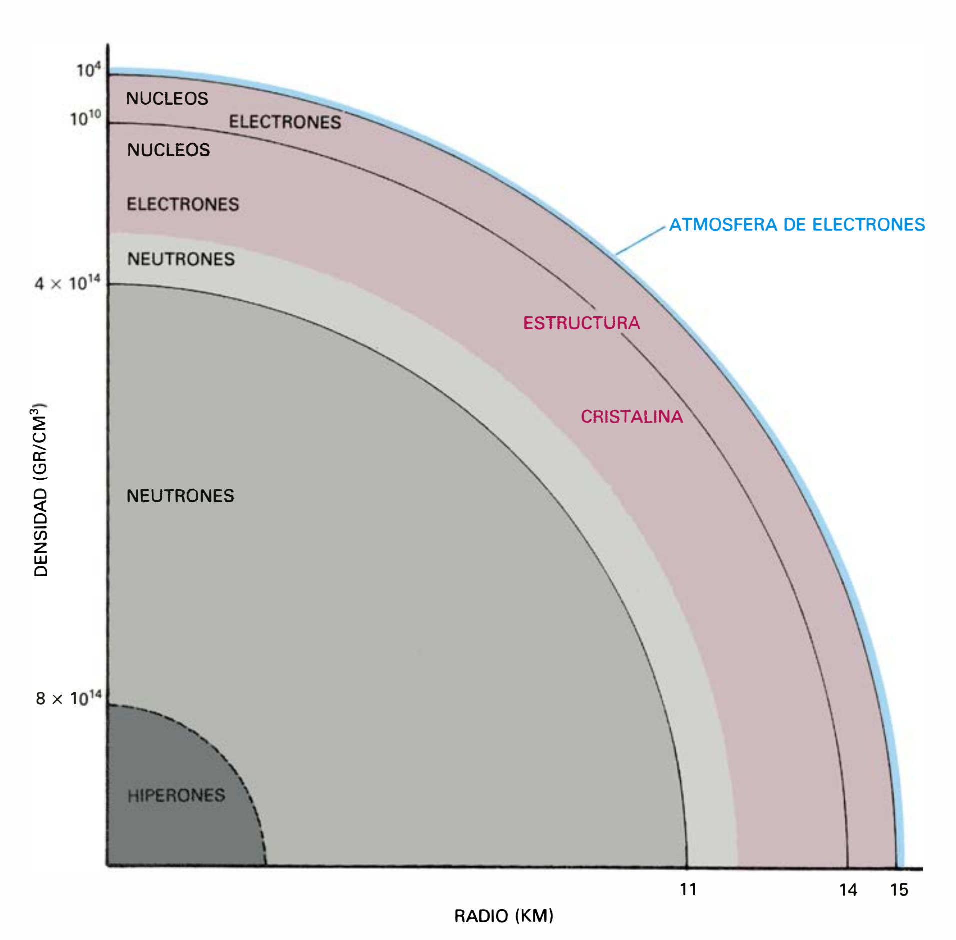
Más aún, se halló que el plano de polarización variaba con la posición considerada dentro del impulso radiado, lo que estaba de acuerdo con un cambio de orientación de los campos magnéticos con respecto al observador durante el tiempo de emisión del impulso. Esto era lo que cabía esperar si el púlsar se encontraba girando.

El modelo básico de un púlsar se fue así perfilando como el de una estrella de neutrones en rotación, con el eje magnético inclinado con respecto a su eje de giro; de forma que sólo cuando aquél se encuentra orientado hacia la Tierra podemos captar la emisión de sincrotrón producida por los electrones que giran en los campos magnéticos. Estas ideas constituyeron un estímulo para el desarrollo de los estudios teóricos sobre la materia ultracondensada y las estrellas de neutrones. Se llegaron así a establecer las características más sobresalientes acerca de la masa, radio y estructura de una estrella de neutrones. Se determinó, por ejemplo, que, para ser estable, la masa de una estrella de neutrones había de estar comprendida entre aproximadamente 1 y 3 masas solares, y cuyo radio sería de sólo unos 10 kilómetros, lo que implicaba para estos objetos densidades del orden de los ¡100 millones de toneladas por centímetro cúbico! En cuanto a su estructura, podían distinguirse cuatro zonas principales: una pequeña atmósfera de electrones libres de unos pocos centímetros de altura, una corteza cristalina de unos pocos kilómetros de espesor compuesta fundamentalmente por átomos de hierro, una gruesa zona intermedia compuesta básicamente de neutrones y, por último, un núcleo central de partículas elementales pesadas. La estrella de neutrones posee, además, una intensa y compleja magnetosfera donde se aceleran las partículas cargadas que producen su radiación.

Quince años después de su descubrimiento, se conocen ya unos 330 púlsares. Se han recogido abundantes datos experimentales que son compatibles con su naturaleza de estrellas de neutrones en rotación. Por ejemplo, observaciones prolongadas de sus períodos muestran que éstos van aumentando progresivamente, esto es, que el giro de los púlsares experimenta un frenado. Este hecho está en perfecto acuerdo con el modelo anterior, en el que un púlsar puede considerarse, macroscópicamente, como un imán que se hace girar con la dirección de sus polos inclinada con respecto a la dirección del eje de giro. Pues bien, en estas condi-

ciones el imán produce una radiación electromagnética de baja frecuencia, cuya energía se obtiene de su energía de rotación, por lo que, en consecuencia, se frena. Esta es la explicación del efecto observado en los púlsares, y que se utiliza para estimar la edad de los mismos: determinando experimentalmente el ritmo de variación del período $\dot{P}$, se considera como parámetro indicativo de la edad de un púlsar (edad característica) al tiempo $P/2\dot{P}$.

Aunque el período de un púlsar aumenta de un modo continuo, se observa en ocasiones una súbita disminución del mismo. También este fenómeno halla explicación satisfactoria dentro del modelo básico de los púlsares que acabamos de exponer. Veamos cómo. Al disminuir la velocidad de rotación, las fuerzas centrífugas también disminuyen, lo que hace que la estrella tienda a contraerse. Y si tenemos en cuenta que su capa más externa es cristalina, esta contracción acontece de una manera brusca, por un resquebrajamiento de la misma que ha venido en llamarse terremoto estelar. Cuando un cuerpo en rotación se contrae, su velocidad de giro ha de aumentar. Por ello, cuando la estrella experimenta una contracción repentina, su velocidad de giro aumenta súbitamente, esto es, se acorta su período.

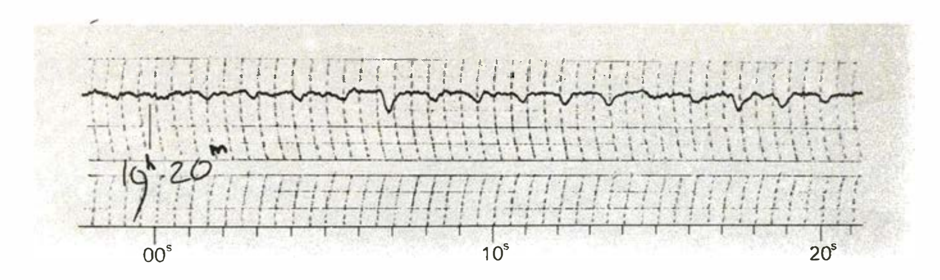


3. EN EL INTERIOR DE UNA ESTRELLA DE NEUTRONES, la materia se encuentra en la forma más condensada en que se ha observado. Más del 99 por ciento de su masa se encuentra formando un fluido de neutrones. Su núcleo interior puede estar constituido por partículas elementales más pesadas (hiperones), cuyo comportamiento con la densidad, presión y temperatura no se conoce todavía bien del todo.

Consideremos ahora una estrella típica. El Sol, por ejemplo. Su radio es de unos 700.000 kilómetros, y su densidad media de unos 1,4 gramos por centímetro cúbico. Su período de rotación se cifra en unos 25 días (no gira como un sólido y su velocidad de rotación depende de la latitud solar considerada); muestra un campo magnético dipolar del orden de 1 gauss. Suponiendo entonces que el Sol se contrajese hasta tener un radio de 10 kilómetros, su densidad aumentaría hasta valores de unos 300 millones de toneladas por centímetro cúbico, su período de rotación sería de unos 0,5 milisegundos y los campos magnéticos alcanzarían valores de 5000 millones de gauss. Todas estas características remedan las presentadas por los púlsares (estrellas de neutrones). Este hecho parece indicarnos que los púlsares no provienen de la evolución de algún tipo de estrellas u otros objetos astronómicos muy extraños, sino que proceden, quizá, de estrellas comunes de nuestra galaxia. No obstante, los parámetros característicos de las estrellas de neutrones son distintos en órdenes de magnitud de los que ofrecen tales estrellas. Tampoco se observan objetos de características intermedias. Lo que nos lleva a pensar que el paso a estrellas de neutrones no transcurre de una forma gradual, sino bruscamente. La verdad es que no se trata de un salto brusco, sino explosivo.

Desde hace siglos, y siempre rodeadas de una aureola de misterio y superstición, la aparición en el cielo de nuevas estrellas ha sido un hecho frecuentemente registrado. Estas estrellas nuevas (novas) surgían de improviso en los cielos para ir poco a poco languideciendo hasta desaparecer al cabo de unas semanas. La mayoría de éstas surgían con un brillo relativamente discreto. Sin embargo, muy de tarde en tarde, algunas de estas estrellas nuevas nacían con un brillo sorprendente. Este fue, por ejemplo, el caso de la estrella que por el año 1054 de nuestra era surgió en la constelación del Toro. De acuerdo con los astrónomos chinos que registraron tan inusitado acontecimiento, durante los primeros días que siguieron a su aparición, la estrella era tan brillante como la luna llena. ¡Lucía más que el resto de las estrellas de nuestra galaxia juntas! Su brillo duró escasos días; poco a poco fue apagándose hasta perderse de vista. En el transcurso de los últimos mil años al menos media docena de acontecimientos similares a éste, aunque de apariencia menos espectacular, han sido observados en nuestra galaxia. Dos de ellos, los acaecidos en 1572 y 1604, contaron con dos espectadores de excepción: Tycho Brahe y Johannnes Kepler, respectivamente.

Con el desarrollo de la instrumentación astronómica, desde finales del siglo pasado se han llevado a cabo numerosas observaciones fotométricas y espectroscópicas de estas estrellas nuevas, en nuestra galaxia y en galaxias externas. Se comprobó así que la mayoría de estas estrellas nuevas se correspondían con la eyección de masas unas 10.000 o 100.000 veces menores que la solar, con velocidades de unos pocos kilómetros por segundo. Aunque su brillo alcanza valores de decenas a cientos de miles de veces mayores que el brillo del Sol, estas explosiones no modifican para nada la estructura de la estrella donde se producen. Se trata de estrellas enanas, que forman parte de sistemas binarios con la compañera muy próxima. Una parte de la masa de



4. PRIMERAS SEÑALES PROCEDENTES DE UN PULSAR (PSR 1919+21), detectadas el 28 de noviembre de 1967 por radioastrónomos de la Universidad de Cambridge. En este registro, la intensidad de las señales detectadas aumenta hacia abajo. El período de rotación de este púlsar se cifra en 1,3 segundos.

las capas externas de la compañera va cayendo hacia ellas hasta que se produce la explosión que eyecta esa masa al medio interestelar. Después, el proceso de robo de masa de la compañera continúa durante cientos de años, hasta que vuelven a concurrir las condiciones para una nueva explosión. Estas explosiones son pues recurrentes. Se les denomina "novas". En una galaxia como la nuestra o como la Nebulosa de Andrómeda se producen varias decenas de ellas al año.

Un fenómeno completamente distinto es el que genera las apariciones de estrellas como las del año 1054 o las observadas por Brahe y Kepler. Este tipo de acontecimientos se observa muy raramente en nuestra galaxia. Sin embargo, el patrullaje de galaxias externas de las últimas décadas, con vistas a la detección de acontecimientos similares, ha elevado a varios centenares el número de los mismos. Estudios espectroscópicos de este tipo de explosiones estelares muestran que, en ellas, masas del orden de la solar salen eyectadas al medio interestelar con velocidades de unos 10.000 kilómetros por segundo. La luminosidad de estas explosiones es diez mil millones de veces la luminosidad del Sol, esto es, ¡100.000 veces mayores que las de una "nova" ordinaria! La energía liberada en una explosión así equivale a la que radiaría el Sol en un intervalo de 40.000 millones de años (al ritmo actual de radiación solar). A la vista de estos valores, es fácil comprender por qué a estas explosiones se las conoce con el nombre de "supernovas".

El material eyectado en una supernova interacciona con el gas interestelar y los campos magnéticos presentes en el mismo, provocando la emisión de radiaciones que van desde las ondas de radio hasta los rayos X y gamma. En algunas direcciones en las que en tiempos pasados se observaron supernovas, se registra hoy la emisión óptica de filamentos en expansión y la intensa emisión de ondas radio con el espectro sincrotrón similar al que veíamos en la radiación de los púlsares. Este tipo de objetos astronómicos forman los llamados "restos de supernova". En nuestra galaxia se conocen más de 120 restos de supernova, la mayoría de los cuales corresponden a explosiones de supernova que tuvieron lugar hace decenas de miles de años.

La pregunta inmediata es ¿cómo se produce una explosión estelar del calibre de las supernovas? Aunque no puede ofrecerse todavía una teoría convincente sobre estas explosiones estelares, se han perfilado ya las líneas maestras de la plausible explicación de estos fenómenos, al menos para estrellas masivas (masas mayores que diez masas solares). Ideas básicas que se deben a los astrofísicos Fred Hoyle y William Fowler. Expongámoslas.

En las regiones centrales de las estrellas masivas las presiones y temperaturas son muy elevadas. Las reacciones atómicas de fusión se producen, pues, con rapidez allí. Millones de años después, la estrella presenta una estructura en capas de distinta composición química, que, en lo que nos concierne, es la siguiente. La estrella tiene un núcleo central compuesto principalmente de hierro y de núcleos del grupo del hierro, que son los núcleos atómicos más estables. Estos núcleos no pueden producir más energía (reacciones exotérmicas) por reacciones de fusión. Rodea a este núcleo central de la estrella una capa donde abundan núcleos ligeros de oxígeno, carbono, nitrógeno, neon y otros, capaces de producir reacciones de fusión muy rápidas y muy exotérmicas. Se trata pues de un material nuclear altamente explosivo. Por último, en la parte más externa de la estrella, donde la presión y la temperatura no son muy elevadas, se encuentran las capas formadas por núcleos de helio y de hidrógeno.

A medida que la estrella evoluciona, aumentan la presión y temperatura en su núcleo central. Cuando en el mismo se alcanzan temperaturas de miles de millones de grados, las colisiones entre los núcleos de hierro adquieren tal energía que éstos se fraccionan en núcleos de helio y neutrones. Ahora bien, se trata de una reacción de fisión muy endotérmica, y en la ruptura de cada núcleo de hierro se pierden 2,2 MeV (un electronvolt, eV, es la energía adquirida por un electrón al ser sometido a la diferencia de potencial de 1 volt; un MeV es un millón de eV) que se obtienen a partir de la energía cinética de las partículas. Quiere esto decir que el gas se enfría. La presión interna no es capaz de soportar ya el peso de las capas exteriores, y el núcleo central de la estrella experimenta una contracción. La energía gravitatoria liberada por la contracción no se emplea, como en etapas anteriores de la evolución de la estrella, en aumentar la temperatura y soportar así la presión hidrostática, sino que se usa en la destrucción de núcleos de hierro; proceso que hace disminuir aún más la temperatura. Por ello el núcleo central de la estrella continúa colapsando.

Pero, ¿qué sucede con la capa intermedia de núcleos ligeros de O, C, N, Ne, etcétera? Al quedar sin el soporte del núcleo central, el material de esta capa cae hacia el interior de la estrella. Esta caída es muy brusca: dura unos pocos segundos. Cuando el colapso del núcleo central cesa, la energía cinética adquirida por esta capa intermedia se convierte rápidamente en calor, aumentando la temperatura y desencadenándose, de forma explosiva, las reacciones de fusión de los núcleos ligeros que la componen. ¡La explosión de supernova se ha producido! Las capas más externas saltan despedidas al medio interestelar a las velocidades mencionadas de miles de kilómetros por segundo. Las reacciones nucleares que se producen en la explosión forman núcleos pesados de Si, Mg, Fe, Co y otros, que enriquecen el medio interestelar de estos átomos que desempeñarán luego tan importante papel en la evolución de las estrellas y en el surgimiento de la vida en los sistemas planetarios que se formen a partir de ese gas interestelar abundante en ellos. Algunos núcleos atómicos adquieren en la explosión velocidades próximas a la de la luz, constituyendo los llamados "rayos cósmicos" que se mueven a grandes distancias atrapados en los campos magnéticos de la galaxia.

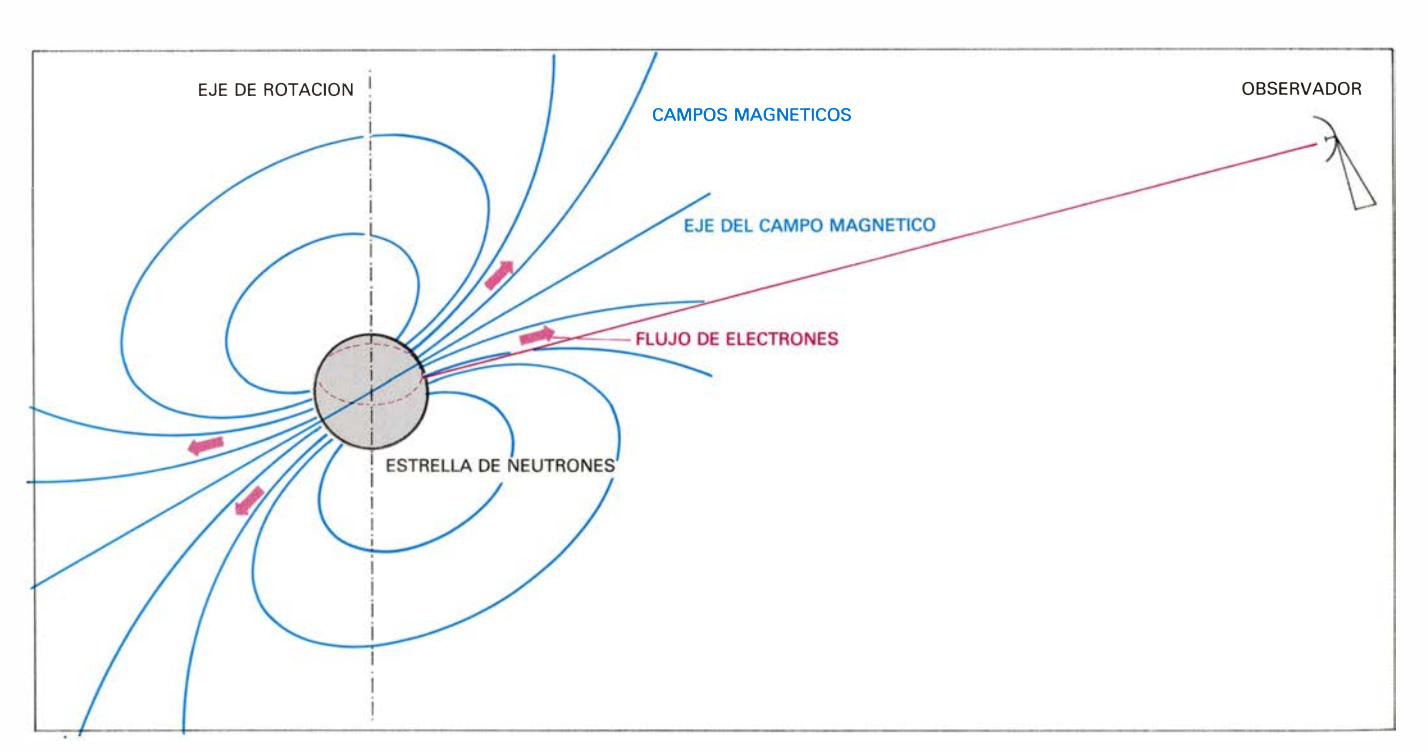
Como acabamos de ver, mientras siguen existiendo núcleos de hierro la energía gravitatoria debida a la contracción se emplea en destruirlos y, al no aumentar la temperatura, el núcleo central de la estrella sigue colapsando. En cuanto los núcleos de hierro han quedado fraccionados en núcleos de He y neutrones, la energía gravitatoria vuelve a emplearse en aumentar la temperatura. Temperatura que alcanzará así valores del orden de los 20.000 millones de grados; como ocurría con los núcleos de hierro, el proceso que se produce entonces es la destrucción de los núcleos de He en protones y neutrones. El núcleo central continúa, pues, colapsando hasta que, dependiendo de su masa total, se llega a una de las dos situaciones siguientes. Si su masa supera en dos veces y media la solar, las fuerzas de gravedad adquieren una magnitud tal, que, por lo que sabemos, nada puede oponerse a la contracción, que prosigue hasta formar un agujero negro: objeto tan ultracondensado que su gravedad impide que ni materia ni radiación puedan salir de él.

Si la masa del núcleo central es menor que 2,5 masas solares, se llega a una situación de equilibrio en la que, con un diámetro de unos 10 kilómetros, la materia se encuentra fundamentalmente en forma de neutrones, la densidad es de unos 10 millones de toneladas por centímetro cúbico y la temperatura ronda los 100.000 millones de grados. En este núcleo central, los campos magnéticos se han concentrado hasta alcanzar intensidades del orden del billón de gauss y, suponiendo que antes de la contracción la estrella estuviese animada de un movimiento de rotación, la conservación del momento angular hace que gire con períodos comprendidos entre milisegundos y escasos segundos. El núcleo central de la estrella, desprovisto por la explosión de las capas que le rodeaban, ¡se ha convertido en un púlsar!

El modelo de formación de los púlsares que acabamos de exponer es una teoría original e interesante. Pero en el método científico el valor de una teoría está en función del apoyo experimental que la sostenga. Y, en mi opinión, esto es especialmente cierto en el caso de las teorías astrofísicas donde, en general, son tantos los parámetros muy imprecisos, o incluso desconocidos, que intervienen en los fenómenos que se estudian, que múltiples modelos distintos pueden dar explicaciones satisfactorias. Sólo el contraste de las teorías o modelos con los datos experimentales permite, si no confirmar completamente alguno de estos modelos, sí descartar, al menos, los erróneos. ¿Cuál es pues el apoyo experimental de la teoría de génesis de los púlsares en explosiones de supernova de estrellas masivas? De acuerdo con esta teoría, el hecho experimental a establecer sería la asociación de púlsares con restos de supernova. En este sentido existen, en primer lugar, argumentos de tipo estadístico sobre la distribución galáctica de estas dos clases de objetos astronómicos, que si bien no son prueba suficiente de la asociación genética de los mismos, resultan ser condición necesaria.

La mayor parte del gas interestelar de nuestra galaxia se encuentra concentrado en el plano de la misma, formando un disco de unos 200 parsecs de espesor. (Un parsec es la distancia a la que la separación Tierra-Sol subtiende un ángulo de 1 segundo de arco. Corresponde a unos 3,26 años luz.) En este disco se han formado las estrellas jóvenes, como son las estrellas masivas que producen las explosiones supernovas donde suponemos que se forman los púlsares.

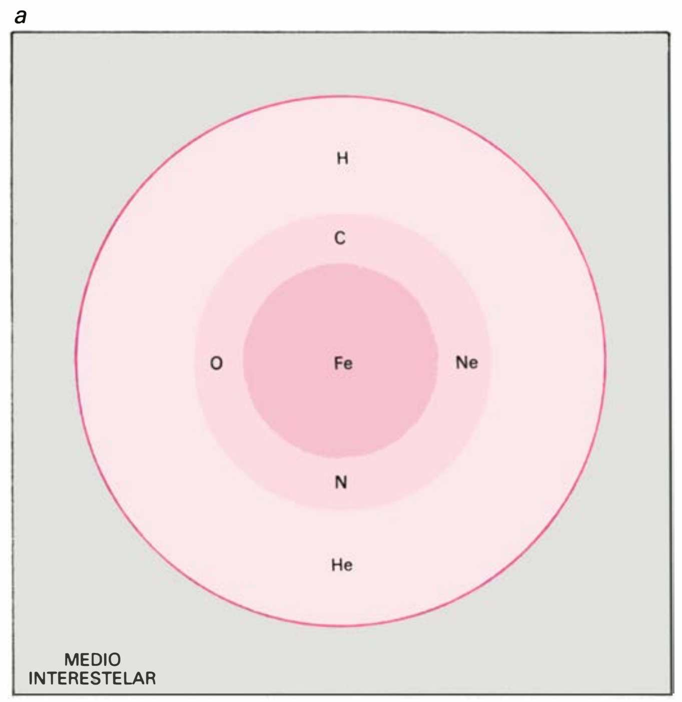
La distribución espacial de los más de ciento veinte restos de supernova conocidos muestra una clara concentración en el plano galáctico, con una altura media sobre el mismo de unos 60 parsecs. Pues bien, esta misma concentración en el plano galáctico se observa para los aproximadamente 330 púlsares descubiertos hasta la fecha, si bien para ellos la altura media sobre dicho plano es algo mayor, de unos 230 parsecs. Asimismo, estudios realizados, entre

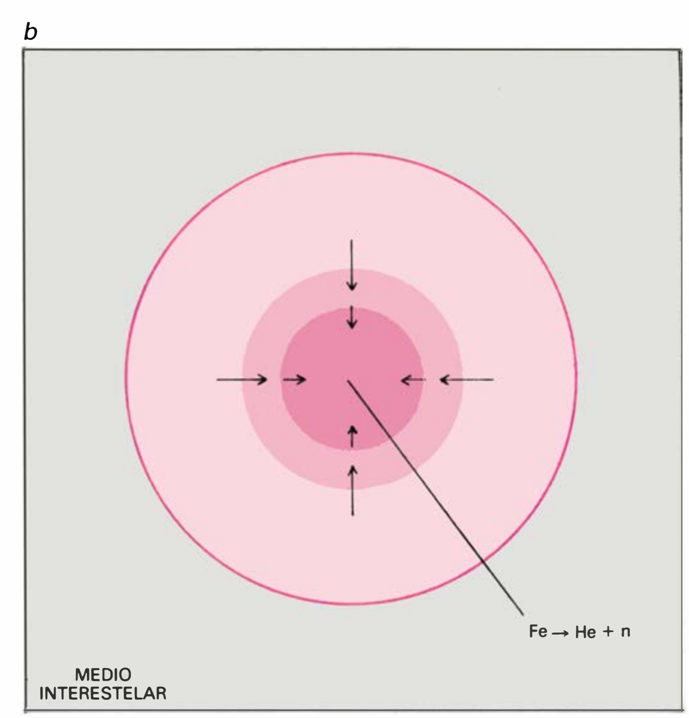


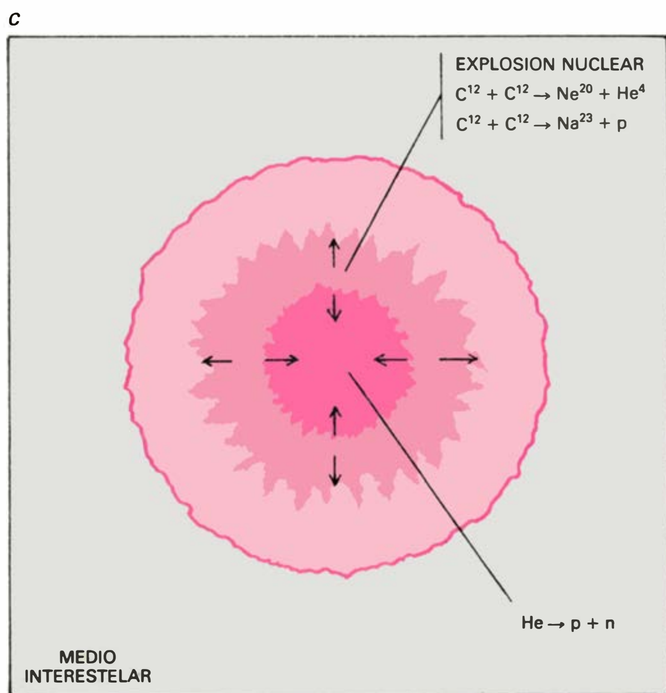
5. LLAMAMOS PULSARES a las estrellas de neutrones en rotación con el eje magnético inclinado con respecto a su eje de giro. La emisión de ondas radio la generan los electrones que se mueven a velocidades próximas a la de la luz siguiendo trayectorias helicoidales alrededor de las líneas de fuerza de los campos magnéticos. Esta radiación, muy directiva, sólo se emite dentro de un ángulo sólido en torno a las líneas de fuerza. Para que se capte en nuestro planeta la emisión de un púlsar, su eje magnético ha de hallarse orientado hacia la Tierra. Se observará, pues, en forma de impulsos periódicos.

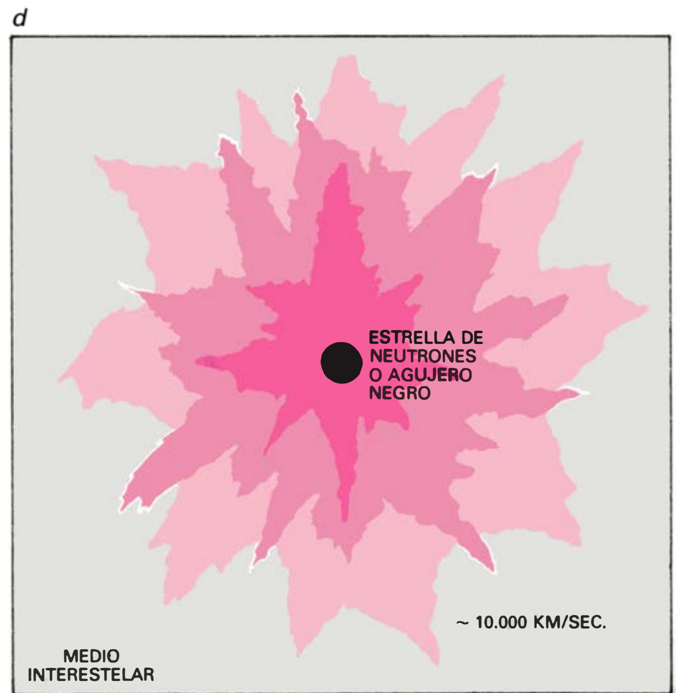
otros por el autor de este artículo y su colaborador Armando del Romero, indican que los púlsares se encuentran situados preferentemente en los brazos galácticos, lo que viene en apoyo de la hipótesis de que estos objetos se originan a partir de estrellas muy jóvenes.

Como acabamos de ver, la distribución espacial de los púlsares y la de los restos de supernova son compatibles con un origen común de ambos objetos a partir de estrellas jóvenes. Sin embargo, la comprobación experimental definitiva de la conexión genética de los púlsares y de los restos de supernova debe establecerse a partir de asociaciones concretas entre parejas de estos objetos. Una asociación de éstas se establecerá, obviamente, por la coincidencia de las posiciones espaciales y de las edades de ambos objetos. El proble-









6. DISTRIBUCION QUIMICA de una estrella masiva y esquema de una explosión de supernova. En el curso de la evolución de las estrellas de masa del orden o superior a las 10 masas solares, se alcanza una distribución química similar a la de la ilustración superior izquierda (*a*). Llegado este punto, el núcleo (compuesto principalmente por átomos de hierro) no puede generar más energía por reacciones nucleares. Por el contrario, la capa intermedia de C, N, O, Ne, etcétera, resulta ser de un material nuclear altamente explosivo. Al ir contrayéndose la estrella, la presión en el núcleo central aumenta y, con ella, la temperatura. Cuando ésta alcanza valores de miles de millones de grados, las colisiones entre los núcleos de Fe provocan la destrucción de los mismos (en núcleos de He y neutrones) con absorción de energía. El núcleo se enfría. Al disminuir su presión interna, colapsa (*b*). La energía gravitatoria se emplea en seguir destruyendo núcleos de Fe; el núcleo central de la estrella continúa colapsando. Este hundimiento del núcleo se detiene cuando se han destruido, en protones y neutrones, hasta los núcleos de He. Este proceso de hundimiento dura contados segundos. Al detenerse este hundimiento, la energía cinética de caída adquirida por la capa de C, N, O, Ne, etc., se transforma en calor, produciéndose una gigantesca explosión nuclear de la misma (*c*). El material situado hacia el exterior de esa capa se arroja al medio interestelar a velocidades de decenas de miles de kilómetros por segundo; el núcleo central se convierte en una estrella de neutrones o en un agujero negro (*d*), según sea su masa. El fenómeno supernova aparece entonces en todos sus aspectos.

ma que se suscita de este modo es el de determinar las distancias y edades de los mismos. ¿Cómo se consigue?

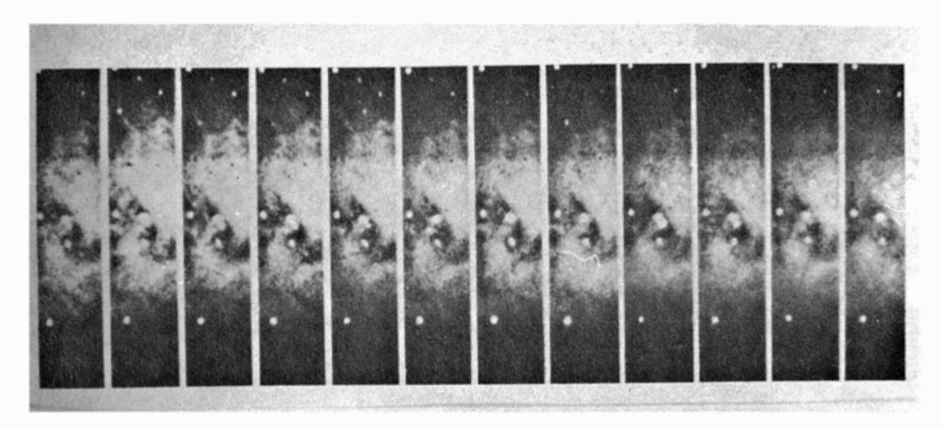
Las primeras distancias a púlsares se determinaron a partir del estudio de las absorciones que sobre su radiación produce el hidrógeno neutro de los brazos espirales de la galaxia. Supongamos que la línea de mira hacia un púlsar atraviesa dos brazos espirales. Dependiendo entonces de que la radiación del púlsar no sea absorbida por el hidrógeno neutro de ninguno de los brazos, lo sea por el del más cercano de ellos o lo sea por el de los dos, podremos concluir que el púlsar se encuentra más cercano que el primer brazo, entre ambos brazos o más lejano que ambos brazos, respectivamente. De este modo se pueden establecer distancias de púlsares (o de cualquier otra radiofuente) o, al menos, límites a las mismas.

Por otra parte, el medio interestelar es, básicamente, un gas ionizado (plasma). En todo gas ionizado las ondas de radio tienen la particularidad de propagarse a velocidades ligeramente distintas en razón de su frecuencia. En concreto, si a través de un gas ionizado enviamos un impulso radioeléctrico hacia un observador, éste recibirá primero las frecuencias más altas. Midiendo el retraso entre la llegada del impulso a dos frecuencias distintas, se determinará la cantidad total de electrones libres situados en la línea de mira entre el emisor y el observador. Si se conoce la distancia entre éstos, se deducirá entonces la densidad electrónica media del gas ionizado por donde se han propagado las ondas. Pero si se supone conocida esta densidad electrónica media, lo que se deducirá será la distancia entre emisor y observador. Durante la primera mitad de los años setenta, el autor con Michel Guelin, del Observatorio de París-Meudon, determinaron la distancia (o límites de las mismas) de una quincena de púlsares distribuidos en todas las direcciones del plano galáctico. Estas medidas nos permitieron establecer el valor de la densidad electrónica media interestelar en el entorno solar que ha venido considerándose estándar desde entonces.

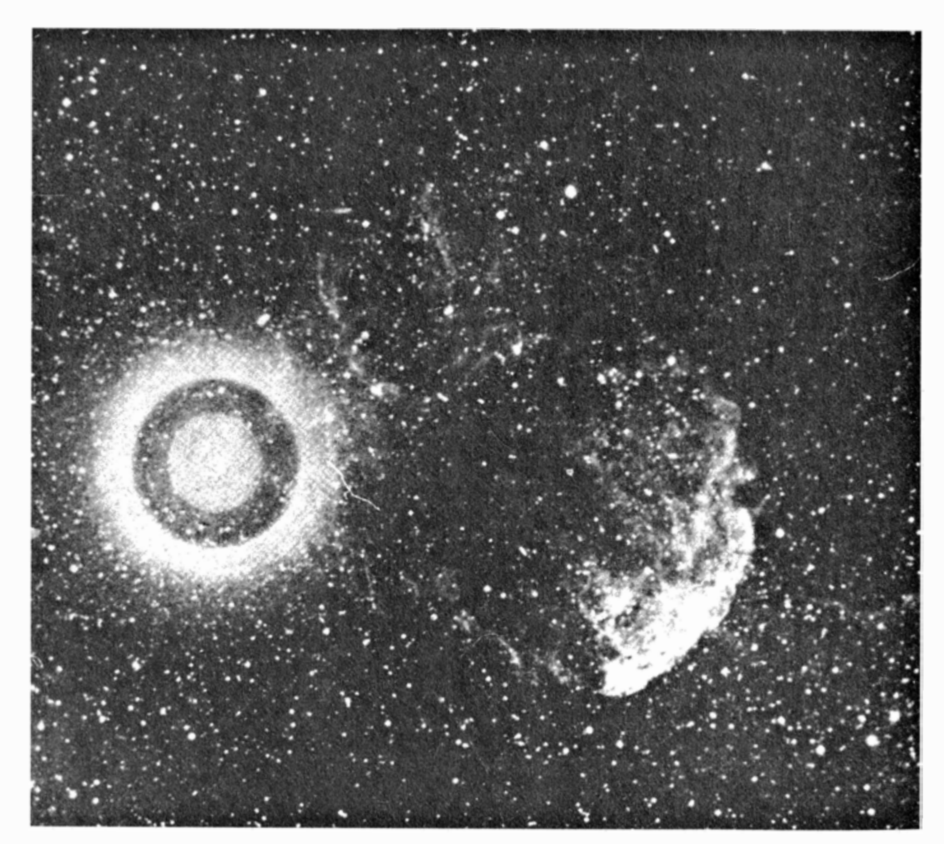
Para la práctica totalidad de los púlsares conocidos, se ha medido el parámetro que determina las diferencias de tiempos de llegada de los impulsos a distintas frecuencias: la medida de dispersión. A partir de este parámetro, y utilizando el valor de la densidad electrónica media interestelar, se deducen, como acabamos de exponer, las distancias de los púlsares. No es necesario insistir en la imprecisión de tales determinaciones. En cuanto a la estimación de las edades de los púlsares, ya vimos más arriba como podían determinarse a partir de la ralentización de su giro.

Con respecto a las distancias de los restos de supernova, se siguen dos procedimientos fundamentales. El primero de ellos es el descrito para los púlsares, basado en las absorciones de la emisión radio por el hidrógeno neutro de los brazos galácticos. Se aplica el segundo procedimiento a restos de supernova suficientemente jóvenes y suficientemente cercanos. Suficientemente jóvenes como para que todavía se perciba la emisión óptica de filamentos y, por observaciones espectroscópicas, se defina su velocidad de expansión. Y suficientemente cercanos como para que se aprecie la expansión angular de los mismos. De las velocidades de expansión angular y lineal pueden deducirse tanto la distancia como la edad del resto de supernova.

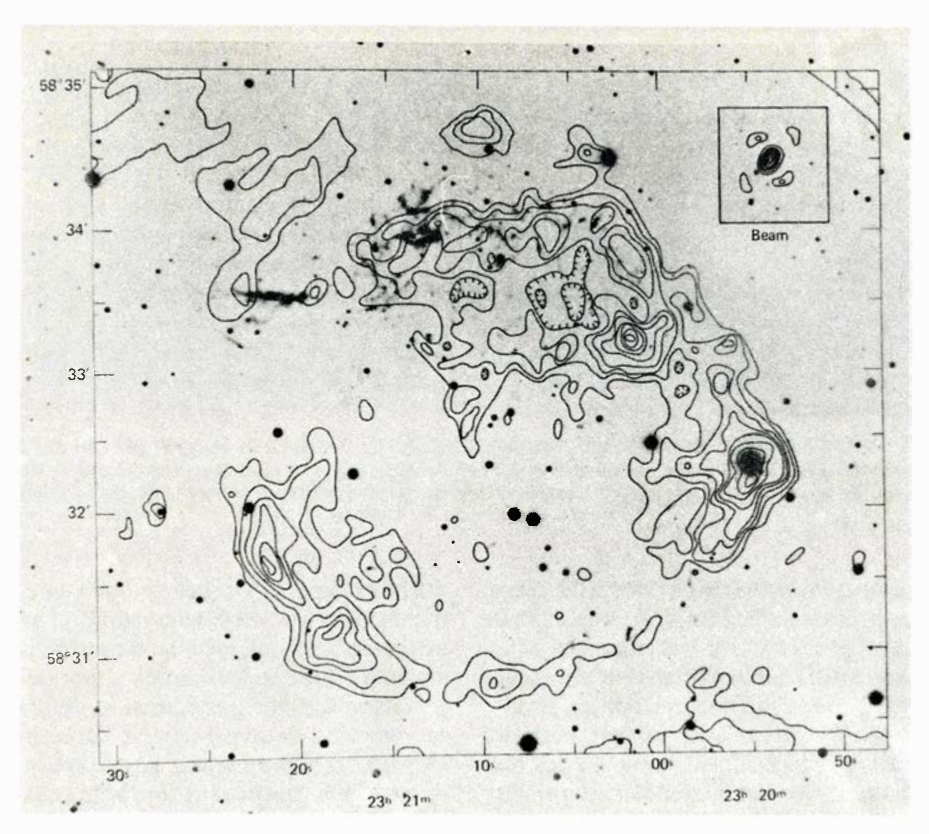
Por otra parte, la teoría de la expan-



7. PARTE CENTRAL DE LA NEBULOSA DEL CANGREJO. Secuencia de imágenes que muestra la variación de la emisión óptica del púlsar PSR 0531+21, producida por mecanismo análogo a la radioemisión. De las dos estrellas que aparecen prácticamente juntas en el centro (en la novena fotografía a partir de la izquierda, que corresponde a un máximo de emisión), el púlsar es la inferior derecha.



8. NEBULOSA IC443 en la constelación de los Gemelos. Se trata del resto de una explosión supernova acaecida hace unos 60.000 años. El material eyectado por la explosión se ha expandido por el medio interestelar adoptando una forma de concha esférica, característica de estos objetos astronómicos. En el entorno de este resto de supernova se halla el púlsar PSR 0611+22, que pudiera ser el residuo estelar de la explosión. La estrella brillante que aparece a la izquierda de la imagen es η Geminorum.



9. RADIOMAPA A 11 CENTIMETROS de longitud de onda del resto de supernova en la constelación de Casiopea. Los restos de supernova son potentes emisores de ondas radio. La emisión de estas radiaciones se produce por electrones con velocidades próximas a la de la luz, que giran en los campos magnéticos interestelares barridos por el material eyectado en la explosión supernova. La mayoría de los restos de supernova conocidos se detectan de hecho a frecuencias radio, ya que su emisión óptica permanece durante bastante menos tiempo y, para restos de supernova lejanos, la absorbe el polvo interestelar.

sión de un resto de supernova en el medio interestelar predice una relación entre su brillo a frecuencias radio y su diámetro, y entre su diámetro y su edad. Estas relaciones se comprueban experimentalmente utilizando los restos de supernova de distancias y edades conocidas; sirven como calibraciones de las distancias y edades de los otros restos. De esta forma, a partir del brillo observado de un resto de supernova se deduce su diámetro lineal que, comparándolo con su diámetro angular, permite conocer su distancia. Y a partir de su diámetro lineal, la teoría de expansión nos posibilita estimar a su vez la edad del mismo. Las distancias y edades así determinadas están también sujetas a grandes imprecisiones, como cabe suponer.

Sentadas estas formas de determinar sus edades y distancias, para establecer asociaciones entre púlsares y restos de supernova dos caminos son posibles: buscar púlsares en el entorno de restos de supernova, y viceversa.

A finales de 1968 dos radioastrónomos norteamericanos, David Staelin y Edward Reifenstein, descubrieron un púlsar (PSR 0531+21) en el centro de la Nebulosa del Cangrejo, que es el resto de la supernova que se produjo en el año 1054 en la constelación del Toro. Constituye, sin duda, uno de los púlsares más interesantes de cuantos se han descubierto. Emite sus impulsos con un período de 33 milisegundos en un rango de frecuencias que va desde las ondas de radio hasta los rayos γ. Su período aumenta al ritmo de 13,5 millonésimas de segundo al año. De acuerdo con estos valores, la edad característica del púlsar es de unos 1200 años, valor muy próximo a los 930 años transcurridos desde la explosión de la supernova. Lo mismo ocurre con las estimaciones de las distancias a las que se encuentran ambos objetos. Por ello, la asociación entre el púlsar PSR 0531+21 y la Nebulosa del Cangrejo constituyó la primera prueba inequívoca de formación de estrellas de neutrones en explosiones supernova.

Un caso análogo de asociación se encontró poco tiempo después entre el púlsar PSR 0833-45 y el resto de supernova conocido por el nombre de Vela X. Este resto de supernova presenta un diámetro angular de más de dos grados, y de la velocidad de expansión de sus filamentos ópticos se deduce una edad de unos 12.000 años. PSR 0833-45, que se encuentra situado dentro de esta supernova, cifra su edad característica en unos 11000 años, que considerando la imprecisión de estas estimaciones puede entenderse en muy buen acuerdo con la de Vela X. Lo mismo ocurre con sus distancias.

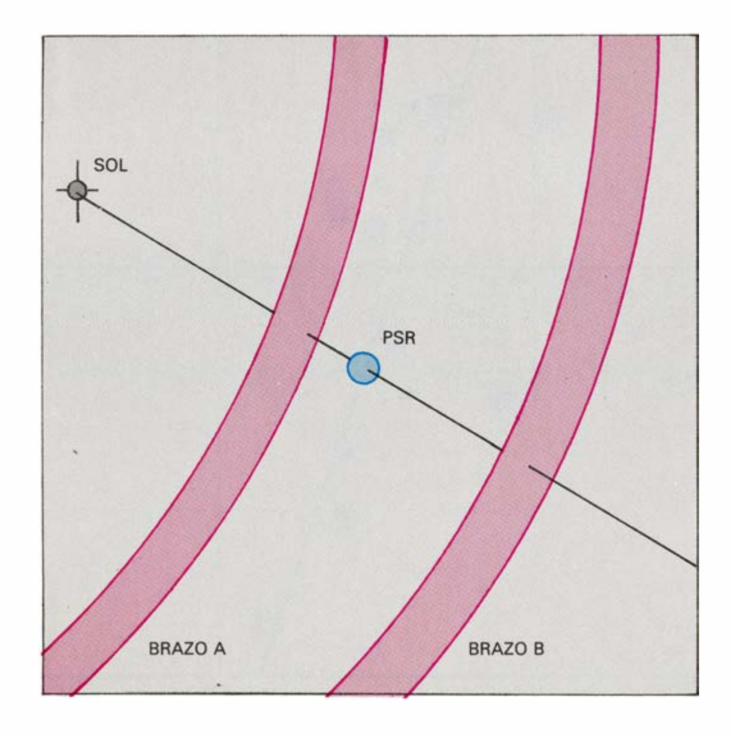
Aunque se ha informado de otras posibles asociaciones entre púlsares y restos de supernova (por ejemplo, la del púlsar PSR 0611+22 con el resto de supernova IC 443) a lo largo de los últimos diez años, sólo los casos de PSR 0531+21 con la Nebulosa del Cangrejo y de PSR 0833−45 con Vela X pueden considerarse asociaciones inequívocas. ¿Por qué sólo dos casos de asociación cuando en nuestra galaxia se conocen más de un centenar de restos de supernova y un número tres veces mayor de púlsares? ¿Significa este resultado que, aunque algunos púlsares se formen en explosiones de supernova, la mayoría de ellos nacen a través de otro mecanismo? Vamos a ver como existen razones físicas y observacionales que pueden dar cuenta del escaso número de asociaciones que se han establecido entre púlsares y restos de supernova.

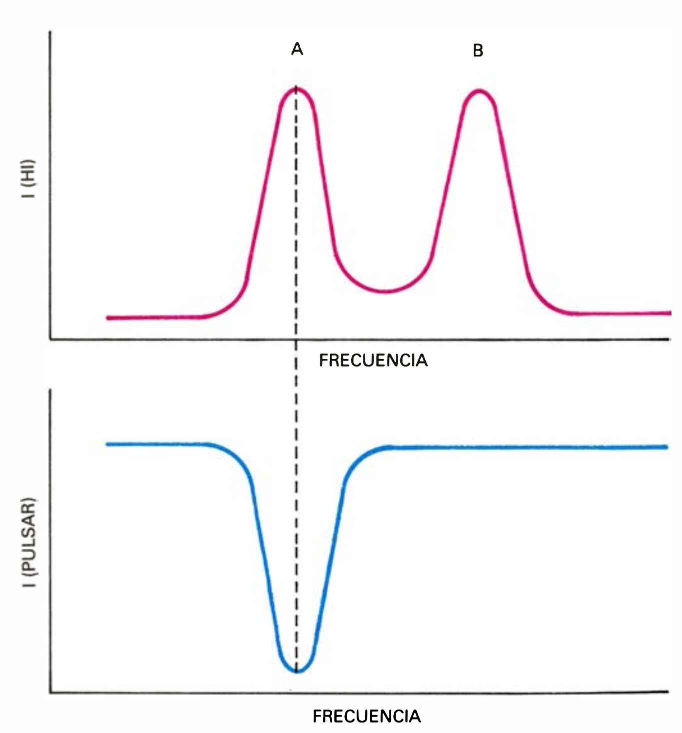
Si nos preguntamos por qué no se encuentran púlsares en el entorno de más restos de supernova las respuestas pueden ser las siguientes. En primer lugar, la emisión de los púlsares es muy directiva. (Es decir, se concentra dentro de un pequeño ángulo sólido alrededor de su eje magnético.) En el entorno de un resto de supernova puede existir un púlsar que se escape a la observación porque la Tierra no se halle en el área barrida por su "faro" de emisión. Teniendo en cuenta que la anchura de los impulsos emitidos por un púlsar es del orden de un 10 por ciento de su período, el porcentaje de púlsares inobservables desde la Tierra puede alcanzar un 80 o 90 por ciento. Esto reduce a una o dos docenas el número de restos de supernova donde cabría encontrarse púlsares observables. Pero hay, además, otras razones por las que puede resultar difícil distinguir púlsares asociados a restos de supernova. Por un lado, en el momento de la explosión el púlsar puede adquirir velocidades de varios cientos de kilómetros por segundo. (Basta una pequeña asimetría en la cantidad de materia eyectada durante la explosión para que el púlsar adquiera velocidades de ese orden.) A partir de medidas directas de posiciones e indirectas del centelleo interestelar de los impulsos emitidos, se han determinado velocidades de púlsares de cientos de

kilómetros por segundo. (Estas grandes velocidades son las que explican el hecho que mencionábamos más arriba de que la altura media de los púlsares sobre el plano galáctico sea mayor que la del hidrógeno neutro o la de los restos de supernova.) Animados por tan grandes velocidades, al cabo de algunos miles de años el púlsar puede haberse alejado lo suficiente del resto de supernova con el que se originó como para que su conexión espacial pase desapercibida o, cuando menos, resulte dudosa. En cualquier caso, las grandes velocidades observadas en los púlsares constituyen un hecho experimental compatible con una génesis violenta de los mismos.

La tercera razón por la que no parece haberse encontrado más púlsares en el entorno de restos de supernova puede ser un efecto de selección en los equipos hasta ahora utilizados en las exploraciones de búsqueda. Estos equipos se han diseñado para observar preferentemente objetos con períodos del orden del segundo. Hasta hace unos pocos meses, PSR 0531 + 21 y PSR 0833−45 eran los púlsares de período más corto y los más jóvenes. Sin embargo, a finales de 1982, radioastrónomos de la Universidad de California, del Observatorio de Arecibo y de la Universidad de Groningen descubrieron de una forma casual un púlsar con un período de 1,5 milisegundos. ¡Una estrella de neutrones que da 667 vueltas por segundo! Unos pocos meses después, en agosto de 1983, se publicaba ya el descubrimiento de un segundo púlsar con período de escasos milisegundos (6,1 ms). En teoría, púlsares con períodos tan cortos pueden ser relativamente abundantes. Una búsqueda de estos púlsares con el equipo adecuado puede dar lugar al establecimiento de nuevas asociaciones entre púlsares y restos de supernova. (La explicación sugerida para la extraordinaria velocidad de giro de estos púlsares recién descubiertos se basa, no obstante, en la suposición de que se trata de púlsares viejos formados en sistemas estelares binarios.)

¿Por qué no se encuentran restos de supernova en las proximidades de púlsares? Ya hemos hablado del problema de las grandes velocidades con las que pueden formarse los púlsares y que al cabo del tiempo pueden escamotear cualquier posible asociación. Pero existe una razón mucho más clara para explicar esta falta de asociaciones: la diferencia de edades entre los púlsares y los restos de supernova. La mayoría de los púlsares observados tienen edades superiores al millón de años, en tanto que un resto de supernova resulta prácticamente indistinguible de las irregularidades del fondo de emisión del plano galáctico al cabo de cien o doscientos mil años. Así pues, para la mayoría de los púlsares conocidos los restos de las supernovas donde se formaron han desaparecido. Entre los 330 púlsares conocidos, solamente ocho poseen menos de 100.000 años. Durante mucho tiempo se desconoció las variaciones de los períodos, y por tanto las edades características, de la mayoría de los púlsares. Las búsquedas de restos de supernova en torno a púlsares se hacían un poco a ciegas y sin la suficiente sensibilidad. Sin embargo, en una exploración realizada recientemente con este fin por el autor en colaboración con Armando del Romero, se ha puesto de manifiesto la emisión radioeléctrica de lo que parece ser el resto de una supernova acaecida hace unos 40.000 años en la dirección de la constelación de la Raposa. Por su distancia y edad, este resto de supernova parece estar asociado al púlsar PSR 1930+22, lo que constituiría un tercer caso de asociación entre estos objetos. Otro caso más de lo que parece ser la asociación de un púlsar y un resto de supernova acaba de ser publicado por un equipo de radioastrónomos australianos dirigido por Richard Manchester; aunque pequeño, el número de asociaciones entre púlsares y restos de supernova resulta significativo. Este número se incrementará, seguramente, en los próximos años, dando más apoyo experimental a la teoría de la génesis de los púlsares en explosiones de supernova. Hemos de indicar además que, aunque en este trabajo nos hemos centrado en la génesis

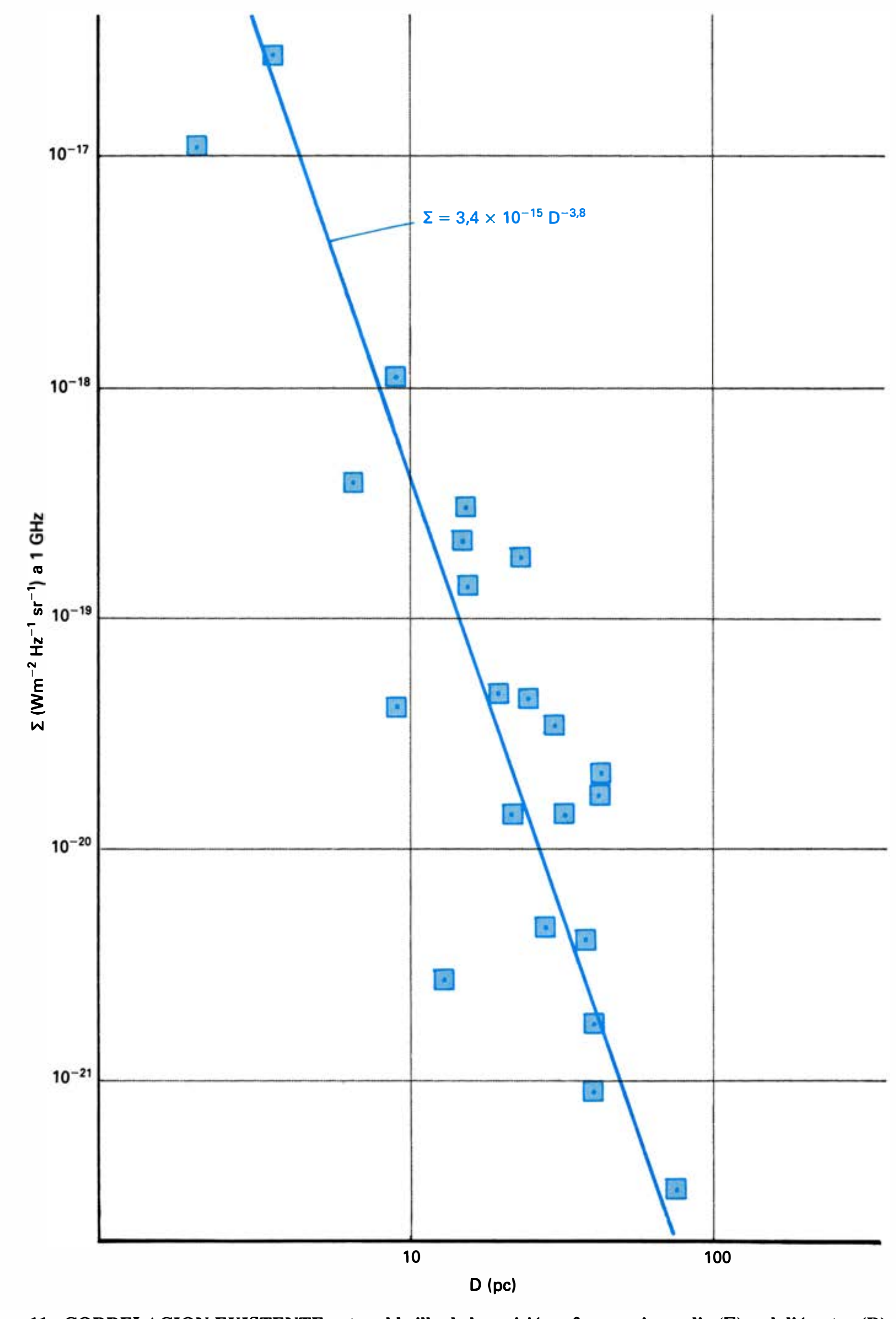




10. DETERMINACION DE LA DISTANCIA de una radiofuente (púlsar) a partir de su espectro de absorción por el hidrógeno neutro (HI) de los brazos espirales de la galaxia. El espectro de emisión muestra los máximos producidos por el HI de los brazos *A* y *B* en la figura superior. El espectro de absorción indica que el púlsar ha de encontrarse entre ambos brazos ya que su emisión sólo es absorbida por el HI del brazo *A* (*parte inferior de la figura*).

de los púlsares (estrellas de neutrones emisoras de impulsos radioeléctricos), existen otros cuatro o cinco objetos compactos emisores de radiación luminosa, de rayos X o gamma, que parecen asociados a restos de supernova.

A lo largo de este trabajo hemos visto cómo por el proceso usual de avance de los conocimientos científicos, por el encadenamiento de observaciones, trabajos teóricos, más observaciones, especulaciones y un poco de suerte, se ha comenzado a proyectar luz sobre el problema del nacimiento de los púlsares. El rompecabezas aún no está completo, pero la figura empieza a perfilarse. Las estrellas –las más masivas– cierran "su espectáculo" con la más extraordinaria "apoteosis final" que pueda imaginarse. Esta apoteosis resulta sumamente útil para formar los átomos pesados con los que más tarde surge la vida. Esperemos que la raza humana no cierre su existencia con una macabra apoteosis de bombas nucleares, apenas incapaz de estremecer un pequeño planeta como la Tierra. Una macabra apoteosis que, al contrario que la de las estrellas, resultaría despreciablemente mezquina e inútil.



11. CORRELACION EXISTENTE entre el brillo de la emisión a frecuencias radio (Σ) y el diámetro (D) de los restos de supernova. Los cuadrados representan restos de supernovas de distancia (diámetro) conocida. Utilizando esta calibración la medida del brillo de la radioemisión de un resto de supernova permite determinar su diámetro y, a partir de éste, su distancia (comparándolo con su diámetro angular).

Un abismo dinámico

Las corrientes frías que fluyen hacia el Ecuador en las profundidades oceánicas se ven frecuentemente agitadas por poderosas tormentas. Estas perturbaciones transportan enormes volúmenes de sedimentos a través del fondo oceánico

Charles D. Hollister, Arthur R. M. Nowell y Peter A. Jumars

"Era una noche oscura y tormentosa." Este parodiado comienzo de novela victoriana describía adecuadamente las condiciones a 4800 metros de profundidad bajo el nivel del mar en la base de la eminencia continental, a 450 millas mar adentro de la costa de Nueva Inglaterra, a mediados de septiembre de 1979. Siempre reina la oscuridad, por supuesto, por debajo de los 1000 metros. Los instrumentos que habíamos anclado unas semanas antes a una profundidad mucho mayor, en la base de la eminencia de Nueva Escocia, revelaban la presencia de una tormenta que duró al menos siete días. Nuestros instrumentos detectaban el flujo de una imponente corriente de fondo hacia el sudoeste, que avanzaba a más de medio metro por segundo (cerca de un nudo), socavando con fuerza el suelo oceánico a su paso. Las fuerzas ejercidas sobre los instrumentos anclados igualaban a las que un vendaval de entre 34 y 40 nudos generaba sobre el nivel del mar.

Este enérgico fenómeno ocurrido tres millas por debajo de la superficie del mar llegó como una revelación a los que habían vivido con la convicción de que el abismo era una región tan calmada como oscura. Estudios recientes han demostrado que en la parte occidental de las grandes cuencas oceánicas, bordeando el pie de la eminencia continental, tormentas periódicas transportan enormes cantidades de fino sedimento que transforma espectacularmente el suelo del océano, excavándolo en unas zonas y depositando grandes volúmenes de fango y arcilla en otras. Gran parte de la demostración de estos flujos de fondo procede del Experimento en la Capa de Transición Bentónica de Alta Energía (High-Energy Benthic Boundary-Layer Experiment, HEBBLE), programa patrocinado por la Office of Naval Research.

El cuadro general que se ha puesto de manifiesto es el siguiente: los acontecimientos dinámicos de las profundidades marinas imitan, en sentido amplio, la circulación general de la atmósfera, que origina los sistemas globales meteorológicos de elevada actividad. Los remolinos de las latitudes medias, frecuentemente asociados con fuertes vientos y copiosas precipitaciones, tienen su contrapartida en los remolinos de alta energía de las profundidades marinas: éstos duran entre varios días y dos semanas y levantan una "cellisca" de fango y arcilla, llevándolos de un lugar a otro. Tales tormentas no son ubicuas, sin embargo, ni siquiera en las partes occidentales de las cuencas marinas. Por ejemplo, a sólo 50 millas al oeste del lugar del HEBBLE, donde descansan los restos del submarino nuclear *Thresher*, a una profundidad de 2500 metros, las fotografías obtenidas no recogen indicio alguno de erosión alrededor del casco en el lugar en que éste se encuentra sobre el fondo, e incluso se ha depositado muy poco fango sobre la superficie del propio casco. Parece ser que las tormentas siguen caminos definidos, pero todavía no se conoce bien sus frecuencias en un punto al azar. A modo de estimación provisional, parece que las tormentas que erosionan el suelo se desarrollan cada dos meses en la región más estudiada.

El socavado periódico del lecho marino y la deposición ocasional de gruesas capas de material fino produce una compleja estratigrafía, muy diferente de la que originaría la suave lluvia de sedimentos que los geólogos marinos venían imaginando tradicionalmente. Los episodios de transporte de sedimentos crean secuencias de capas que se parecen mucho más a las encontradas en zonas marinas someras donde fuertes tormentas de viento crean lo que los geólogos llaman tempestitas, en las que la simple acción de depositar el material en capas queda dominada por el solapamiento de lechos de sedimentos ordenados por tamaños de partícula.

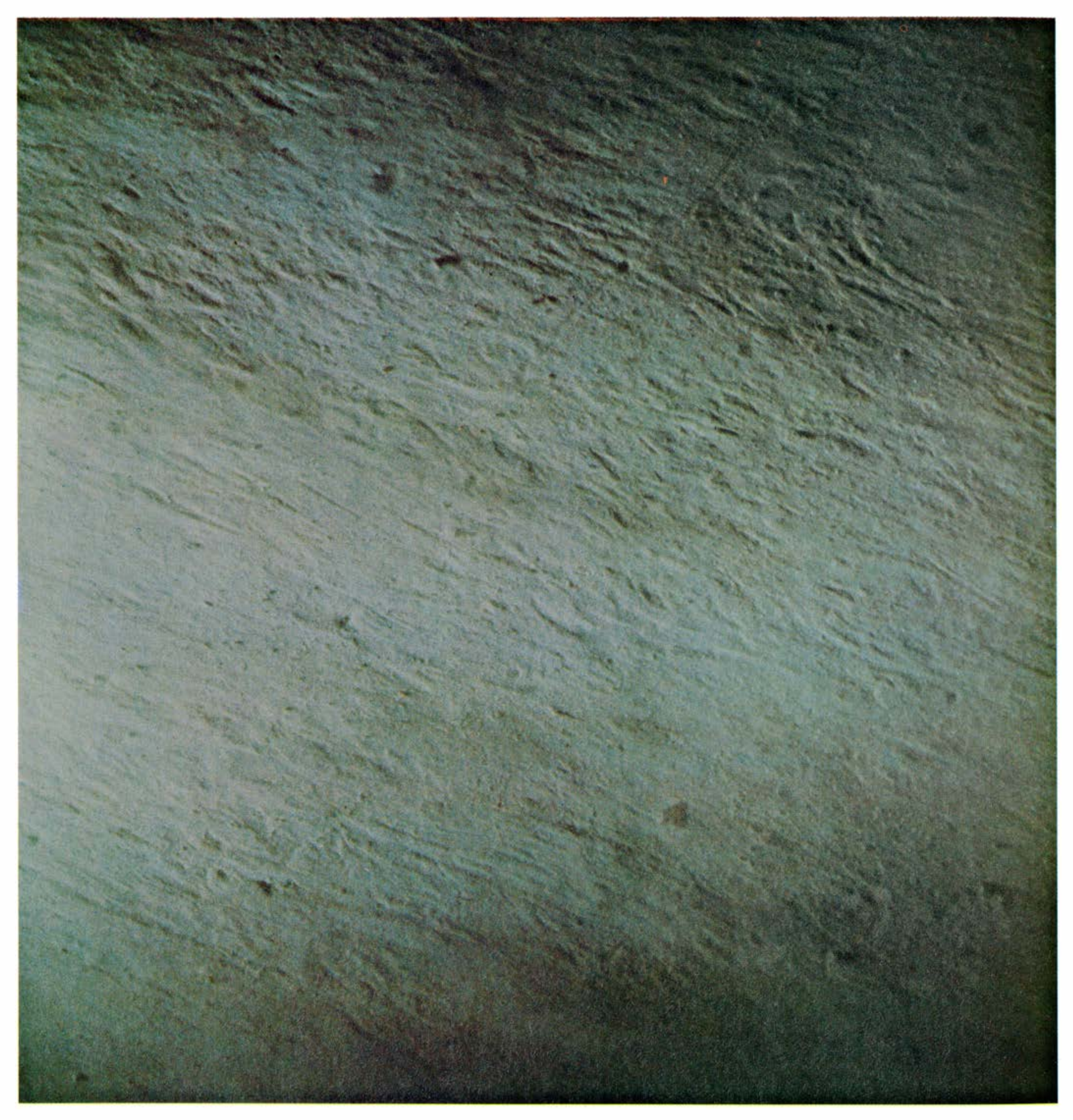
Nuestros nuevos hallazgos pueden obligar a los petrogeólogos a revisar las ideas tradicionales sobre los mejores lugares de búsqueda de yacimientos petrolíferos no explotados. El descubrimiento de fuertes corrientes y tormentas abisales también tiene importantes consecuencias para la práctica de operaciones submarinas y antisubmarinas, la ubicación y diseño de estructuras sobre el fondo del mar y la consideración de las profundidades oceánicas como lugar donde verter materiales de desecho.

La noción de un abismo tranquilo había recibido tan amplia aceptación que muchos investigadores se resistieron, al principio, a aceptar la evidencia de la existencia de fuertes corrientes y tempestades en las profundidades marinas. El primer argumento en favor de la existencia de tales corrientes procedió de la teoría. El agua fría es más densa que el agua caliente. Los modelos de circulación oceánica demostraban que el hundimiento de agua fría próxima a los polos debía generar corrientes fuertes, profundas y regulares, dirigiéndose hacia el Ecuador. Las observaciones subsiguientes no sólo confirmaron la presencia de las corrientes profundas, sino que revelaron también la existencia de remolinos en la parte occidental de las cuencas oceánicas que pueden tener 300 veces la energía de la corriente media. Las fotografías de los fondos marinos por debajo de las corrientes profundas mostraron grandes lechos con varios niveles, indicadores de un transporte activo de sedimento. La prueba definitiva de la actividad existente a grandes profundidades derivó de las medidas directas de corrientes y sedimentos en el Atlántico Norte, llevadas a cabo en el programa HEBBLE.

Antes de describir con algún detalle los hallazgos del HEBBLE pasemos revista, brevemente, a las fuentes y sumideros de sedimentos marinos profundos y a las fuerzas que activan el patrón

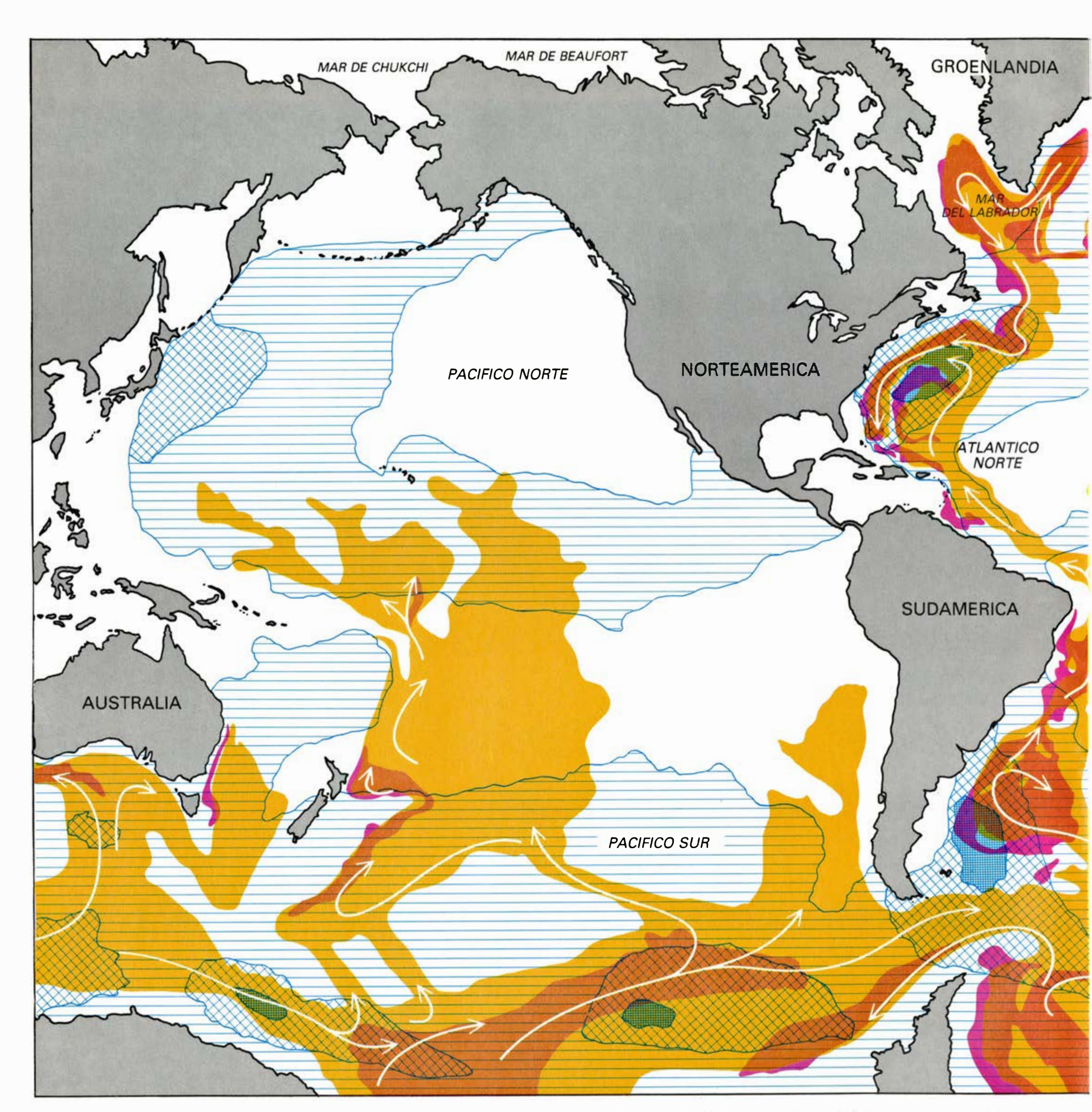
global de circulación oceánica. Los sedimentos que van a parar al fondo pertenecen a dos tipos principales. Un componente son los detritos, cuyo origen es la erosión de las rocas de los continentes e islas. Estos detritos, juntamente con la materia vegetal perecedera de las plantas terrestres, son arrastrados por los ríos al borde del continente y hacia la plataforma continental desde donde los arrastran las corrientes marinas. Una vez que el material detrítico alcanza el borde de la plataforma continental, va cayendo hasta la base de la eminencia continental por acción de la gravedad. En las regiones subtropicales, parte importante del material terrestre es arrastrada al mar por la acción de los fuertes vientos del desierto. Cada año alcanzan las desembocaduras de corrientes y ríos unos 15.000 millones de toneladas de material continental. La mayor parte de éste queda atrapado allí mismo o sobre las plataformas continentales; sólo algunos miles de millones de toneladas escapan a las profundidades marinas.

El segundo componente importante que llega al fondo del mar está formado por caparazones y esqueletos de organismos microscópicos que viven y mueren en las aguas iluminadas de los primeros 100 metros de todos los océanos. Este material biológico aporta al contenido total del fondo unos tres mil millones de toneladas por año. Las tasas de



1. FONDO ESTRIADO Y DENUDADO, a una profundidad de 4850 metros en la base de la eminencia continental, unas 450 millas aguas adentro de la costa de Nueva Inglaterra. La zona está sujeta a estudio como parte del Experimento en la Capa de Transición Bentónica de Alta Energía (HEBBLE), en el que participan los autores. El proyecto está financiado por la Office of Naval Research. La ausencia de rasgos biológicos en el fondo marino confirma las medidas tomadas por medidores de flujo anclados que demuestran que el fondo ha sido arrasado no hace mucho por una tormenta de profundidad.

acumulación vienen gobernadas por las tasas correspondientes de productividad biológica, controladas en parte por las corrientes de superficie. Cuando estas corrientes se encuentran, decimos que hay una convergencia; donde se separan, una divergencia. Las zonas de divergencia de las principales masas de agua permiten que las aguas profundas, ricas en nutrientes, "se cosechen" en la zona iluminada donde tiene lugar la fotosíntesis y la fijación de carbono orgánico resultante. Estas franjas de elevada productividad y altas tasas de acumulación se encuentran normalmente alrededor de los principales frentes oceánicos (como las regiones que rodean el Atlántico), y a lo largo de los bordes de las corrientes principales (como la corriente del Golfo, aguas afuera de Nueva Inglaterra, y la corriente de Kuroshio, cerca de la costa del Japón). También se concentra agua rica en nutrientes en una zona situada a lo largo del Ecuador, donde hay una divergencia de dos giros principales, originados por el viento.

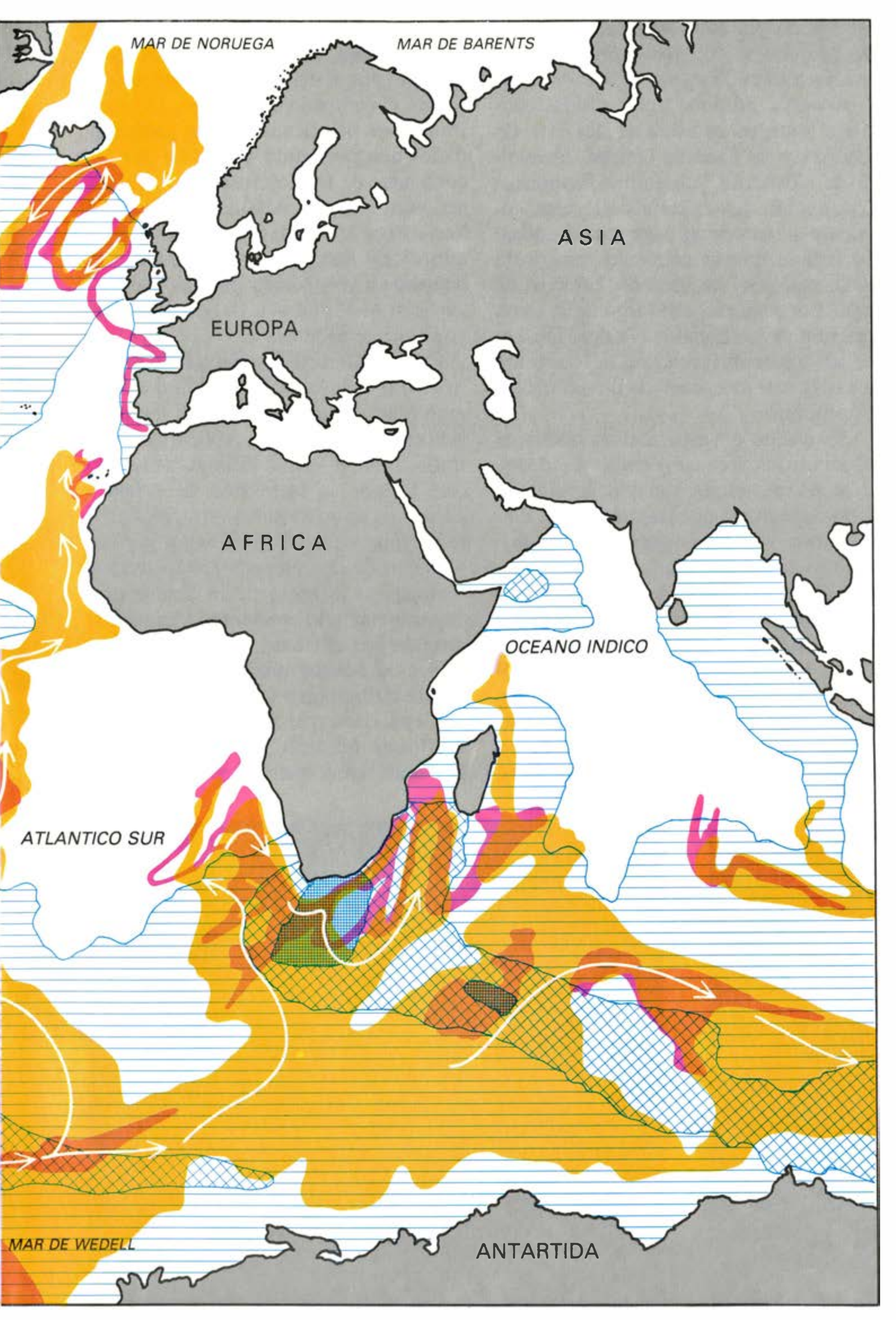


2. LAS CORRIENTES ABISALES (*en amarillo*) **transportan agua fría y densa desde las regiones polares hacia las tres grandes cuencas oceánicas. Aunque las cuencas del Atlántico y del Pacífico están conectadas con el océano Artico, no puede fluir mucha agua profunda del Artico al Pacífico a través del somero estrecho de Bering. Por el contrario, el Atlántico recibe fuertes flujos de agua abisal fría de ambas regiones polares. Las corrientes se guían por la topografía del fondo y se desvían hacia el oeste debido a la fuerza de Coriolis, consecuencia de la rotación de la Tierra hacia el este. Las áreas sombreadas con trama azul representan variaciones en la energía cinética asociada con los remolinos próximos a la superficie. La zona más densa corresponde a una energía cinética (expresada en unidades que muestran la fluctuación de la velocidad alrededor de un valor medio) de más de 20 centímetros cuadrados**

La velocidad de sedimentación de organismos marinos suele hallarse influida por la profundidad del agua. La capacidad de un caparazón de escapar a la disolución una vez ha descendido al fondo depende, en gran medida, del tiempo que permanece sobre el suelo antes de ser recubierto y, por tanto, protegido de la acción corrosiva del agua marina profunda, sobresaturada en carbonatos cálcicos. A mayor profundidad, la deposición es más lenta, los caparazones tienen que recorrer en su caída un trayecto mayor y atraviesan aguas cada vez más corrosivas.

Si las aguas más superficiales fuesen uniformemente productivas, y si no hubiese corrientes de fondo, existiría una capa de material más o menos uniforme que se depositaría sobre el suelo original volcánico y rugoso. Sin embargo, esto no es así. Echando una ojeada al mapa del mundo podemos ver que los mayores ríos de Norteamérica y Sudamérica desembocan en el Atlántico, por lo que este océano recibe mucha más materia de origen fluvial que el Pacífico. Además, las fosas submarinas profundas que se encuentran alrededor del Pacífico atrapan gran parte del material que alcanza el borde continental del océano.

El Atlántico es un océano menor y menos profundo que el Pacífico; sus productos biológicos quedan, pues, enterrados más rápidamente y, por ello, tienen mayores posibilidades de permanecer al abrigo que los correspondientes productos del Pacífico. En promedio, el fondo del Atlántico recibe más cantidad de sedimento por unidad de área (aproximadamente un centímetro cada 1000 años) que el suelo del Pacífico. Además, el patrón global de fuertes corrientes cercanas al fondo crea un mayor potencial de redistribución en el Atlántico que en el Pacífico. Por todas estas razones, el Atlántico es el océano ideal para estudiar los efectos geológicos de la enérgica circulación profunda.



por segundo al cuadrado. El rayado horizontal representa valores entre cuatro y diez veces las mismas unidades. La cuadrícula menos densa representa los valores entre 10 y 20. Los valores de la energía cinética de los remolinos se basan en parte en observaciones sobre la velocidad de los barcos y en parte en mediciones de satélite de las variaciones en la elevación del océano. La energía del remolino se transfiere al fondo del mar, donde interactúa con las corrientes de profundidad para erosionar y redistribuir los sedimentos, originando grandes áreas (*color rojo*) con lechos de partículas de tamaño decreciente.

Consideremos la naturaleza de las corrientes del fondo. En las regiones polares, el agua superficial posee una densidad mayor que el agua de latitudes inferiores por ser, a la vez, más fría y más salada. (La salinidad del agua superficial que fluye hacia los polos aumenta por evaporación, y aumenta luego más por la exclusión de la sal del hielo al congelarse el agua.) Al crecer su densidad, el agua se hunde y se propaga hacia el Ecuador. Las primeras teorías sugerían que este flujo termohalino podía tomar la forma de corrientes profundas que se desviarían hacia el oeste en su rumbo al Ecuador. Esta desviación es una simple consecuencia de la rotación de la Tierra hacia el este, que origina una fuerza aparente: la fuerza de Coriolis. El camino exacto que toma el agua circulante también está controlado por la distribución de las masas continentales y por la topografía del suelo oceánico.

Los tres océanos principales –el Atlántico, el Pacífico y el Indico– tienen una conexión directa con el continente Antártico, donde son alimentados por corrientes profundas y frías. Al fluir hacia el Ecuador, esas corrientes se desvían hacia el oeste por la fuerza de Coriolis. Así, una masa de agua que se mueve hacia el norte en el hemisferio sur es desviada hacia la izquierda si

miramos corriente abajo. Las corrientes profundas son forzadas hacia el borde occidental de las tres cuencas oceánicas y hacia sus promontorios submarinos. Esta compresión contra los continentes hace que las corrientes adquieran velocidad, del mismo modo que un curso de agua fluye con mayor velocidad al estrecharse el canal por el que discurre. El océano Indico, sin embargo, se distingue de los demás porque no está conectado con la región polar septentrional; tiene, pues, una sola fuente de agua fría profunda.

Aunque el Pacífico y el Atlántico están unidos al océano Artico, el flujo de agua profunda fría hacia el Pacífico es insignificante porque el Pacífico Norte está, de hecho, separado del Artico por el estrecho de Bering, de escasa profundidad, frontera entre Alaska y la Unión Soviética. Además, el agua del Pacífico, menos salada que la del Atlántico por la menor entrada de sales de los ríos, se congela más fácilmente debido al viento frío subártico; el agua cercana a la superficie que permanece sin congelar no se halla suficientemente enriquecida en sales, ni es lo bastante densa para caer al fondo.

La situación cambia por completo en el Atlántico. Se abastece éste de dos fuentes importantes de agua salada: el agua del golfo de México, llevada hacia el norte por la corriente del Golfo, y el agua profunda del Mediterráneo. Esos dos aportes hacen que el agua del Atlántico Norte sea más salada que la del Pacífico Norte. El agua del Atlántico Norte se mueve hacia el norte cerca de la superficie y entra en el mar de Noruega, donde se enfría a unos cero grados Celsius sin congelarse, se vuelve más densa y se hunde. Al alcanzar el fondo, el agua fría y densa invierte el sentido de su circulación; fluye de nuevo hacia el Atlántico a través de una serie de pasos estrechos y profundos practicados en el promontorio submarino que conecta Groenlandia, Islandia y Escocia.

Forzado por la topografía, este gran volumen de agua profunda se mueve hacia el sur y se ve forzado hacia la derecha, mirando aguas abajo, contra el margen continental del este de Canadá y los Estados Unidos, formando la Corriente Submarina Fronteriza Occidental. La existencia de esta corriente se reconoció hace dos décadas. Se estima que la corriente transporta diez millones de metros cúbicos de agua por segundo a lo largo de la costa oriental de los Estados Unidos. Durante las tormentas abisales, la corriente arrastra casi una tonelada de sedimento por minuto.

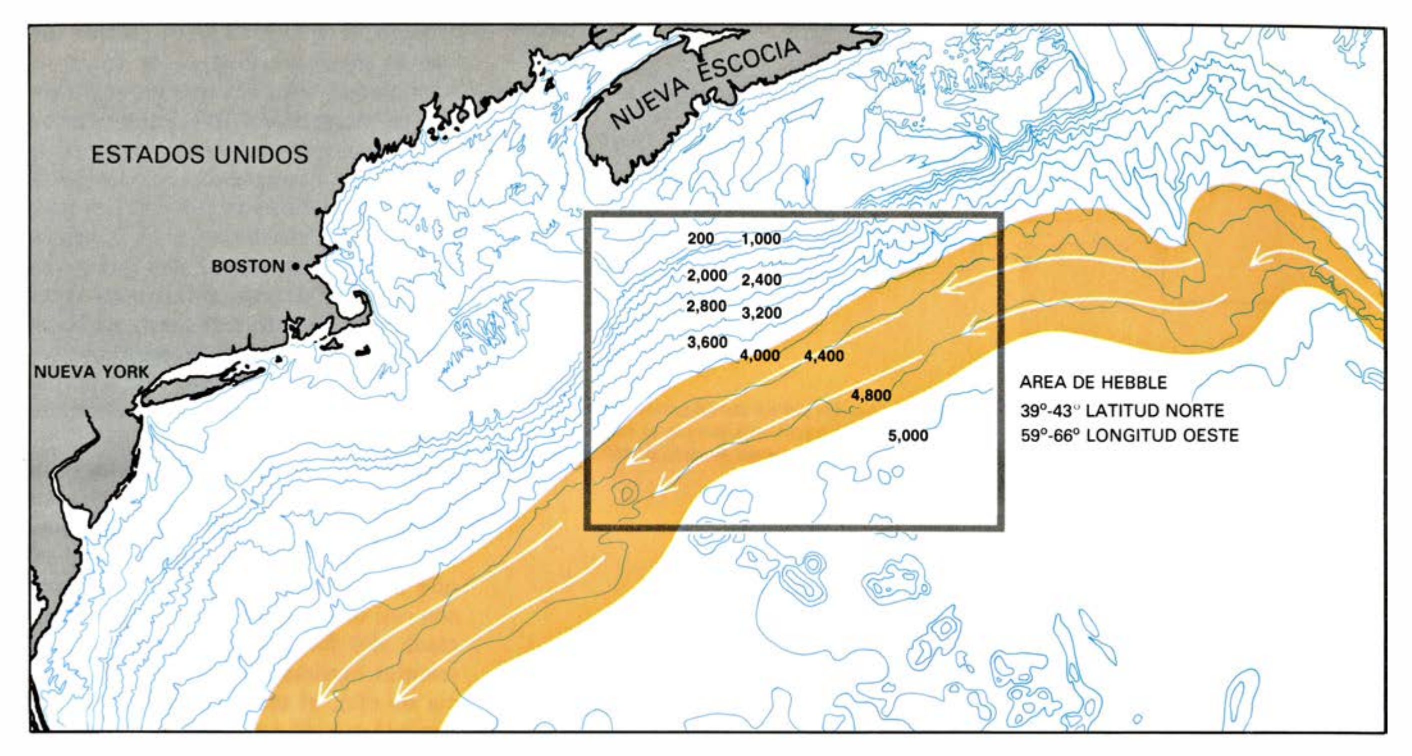
Apoyados en estos datos, podemos observar los océanos y tratar de identificar dónde puede haber acúmulos de lodo depositado por las corrientes, modificados verosímilmente por las tormentas de profundidad. El mayor volumen de lodo inorgánico y las corrientes profundas de mayor fuerza se han de encontrar en el Atlántico occidental. Las latitudes altas de la zona occidental del Atlántico, Norte y Sur, ofrecen un elevado potencial para las tormentas abisales; y es en estas zonas donde las fotografías del suelo revelan un relieve formado y modelado por fuertes corrientes de fondo. Esos lechos en gradación cubren los mayores acúmulos de sedimentos del planeta: hasta 200 kilómetros de anchura, 1000 kilómetros de longitud y 2 kilómetros de profundidad. Los arrecifes exteriores de Blake-Bahama, en Florida, son ejemplos notables de ello. Parece plausible que todo el talud continental Atlántico, a profundidades entre tres y cinco kilómetros aguas adentro de Norteamérica y Sudamérica, se haya formado en gran medida por corrientes profundas que siguen el contorno de la costa. Las perforaciones practicadas en las profundidades han permitido descubrir que las corrientes de fondo erosionaron extensas regiones del Atlántico occidental hasta hace 15 o 20 millones de años y que desde entonces ha prevalecido la deposición controlada por las corrientes, con la formación de grandes acúmulos de sedimentos.

Por doquier, las corrientes de fondo han conformado la distribución de los materiales de grano fino a lo largo de las costas de Africa, la Antártida, Australia, India y Nueva Zelanda. En toda esta región, la formación de grandes depósitos de materiales, principalmente biógenos, está favorecida por la combinación de una elevada productividad biológica a lo largo de la divergencia circumpolar y la corriente circumpolar dirigida por el viento. Aunque muchos de esos depósitos quizá no sean directamente atribuibles a las corrientes abisales, está claro que zonas muy extensas del fondo oceánico están modificadas por materiales que las corrientes pro-





3. ZONAS QUIETAS Y ACTIVAS de las profundidades. Las fotografías del fondo del mar nos las identifican fácilmente. En un área tranquila (*izquierda*) se observa una superficie transformada por los organismos bentónicos. Los pequeños tubos construidos por los foraminíferos, animales diminutos con caparazón, sobresalen hasta 10 centímetros del fondo. En una zona con fuertes corrientes de fondo (*derecha*), el suelo está arrasado y la dirección de flujo de la corriente se revela por las líneas de los sedimentos depositados en el lado protegido de pequeños montículos. La fotografía de la izquierda se tomó en el talud continental a una profundidad de 1000 metros; la fotografía de la derecha, en la eminencia continental de Nueva Inglaterra, a 5000 metros.



4. AREA DE FONDO MARINO estudiada en el proyecto HEBBLE. Se encuentra a una profundidad de tres millas con su centro a 450 millas al este de Boston, en la base de la eminencia continental. La banda amarilla muestra cómo las corrientes de fondo que se originan cerca de Groenlandia y en el mar de Noruega se desvían hacia el oeste contra el talud continental de Norteamérica y suben hacia el Ecuador. Tormentas periódicas aumentan la velocidad de la corriente en la zona del HEBBLE desde un valor normal de una décima de nudo hasta un nudo o más, levantando "celliscas" de cieno y barro.

fundas arrastran. La misión principal de las tormentas periódicas puede ser remover el sedimento, que subsiguientemente es arrastrado hacia otros lugares por las corrientes de fondo, menos enérgicas aunque más persistentes.

Los instrumentos anclados en los fondos marinos han añadido importantes detalles a la imagen intuitiva de cómo se erosiona, transporta y deposita de nuevo el sedimento. Este proceso no puede reproducirse fácilmente en el laboratorio. Seguramente, el agua en movimiento ejerce una presión sobre el fondo que es, en última instancia, la responsable del movimiento del material de grano fino y del modelado de los lechos en gradación. El flujo estacionario sobre un lecho horizontal conforma una estructura característica. En la interfase entre el lecho y el agua una capa de moléculas de agua se adhiere al lecho y queda esencialmente inmovilizada. Encima mismo de esta interfase, si el flujo es lento y el fondo liso, habrá una lámina de agua moviéndose sobre el lecho con un flujo laminar, en el que la fuerza dominante será la viscosidad del agua. A la altura de un centímetro escaso, las fuerzas de viscosidad se ven superadas por la inercia del fluido: domina la mezcla turbulenta.

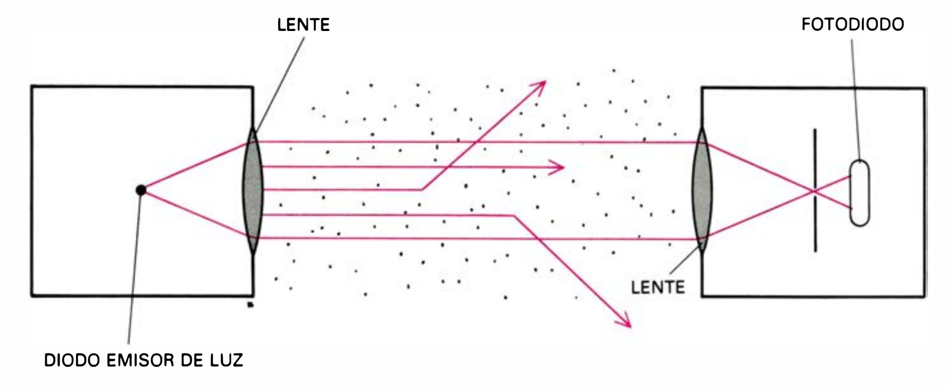
Dentro de la capa viscosa, cuando y donde ésta existe, la velocidad de flujo aumenta linealmente con la altura. En los escasos metros cercanos al fondo, donde hay flujo turbulento, la mezcla es intensa y la velocidad aumenta exponencialmente con la altura. Esta región se denomina capa logarítmica, porque en su interior se obtiene una línea recta cuando se representa la velocidad media de flujo en función del logaritmo de la altura sobre el fondo. En esta región, las propiedades de masa del agua, tales como la salinidad, temperatura y concentración de sólidos en suspensión se mezclan activamente.

A grandes escalas verticales, los movimientos del agua sufren la influencia de la fuerza de Coriolis: en el hemisferio norte, los fluidos con movimiento acelerado se desvían hacia el oeste y los dotados de movimiento decelerado se desvían hacia el este. Cuando las corrientes se ven frenadas por rozamiento en el fluido que avanza subyacente en movimiento más lento y, en última instancia, por el fondo, la dirección de la corriente vira hacia el este, y forma una trayectoria característica conocida como espiral de Ekman (en honor del oceanógrafo sueco V. Walfrid Ekman). La fricción entre capas de fluido que se mueven a distintas velocidades continúa generando mezcla turbulenta.

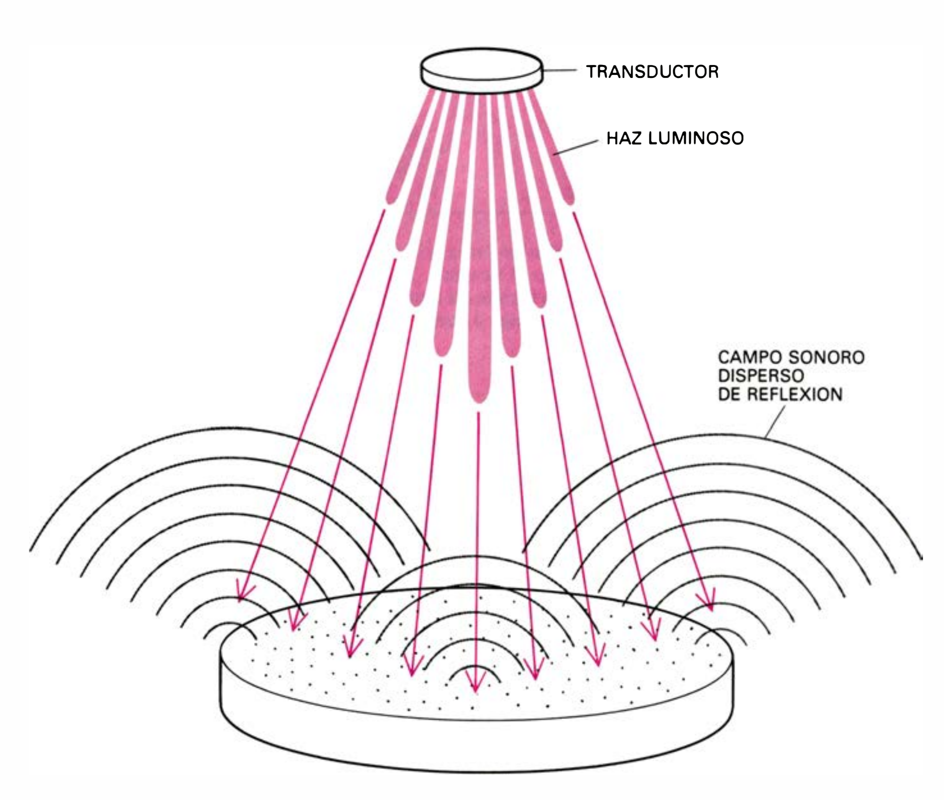
Los efectos de la fricción con el fondo no se extienden más allá de 100 metros hacia arriba, a lo largo de la columna de agua. Esta región, cuyas propiedades se encuentran bien mezcladas por la turbulencia, se denomina habitualmente capa mezclada de fondo. Su espesor está limitado por la atenuación de la mezcla turbulenta, un proceso que extrae energía del flujo. A una altura determinada, proporcional a la velocidad de la corriente que se encuentra por encima y a la magnitud de la fuerza de Coriolis, la fricción ya no es suficiente para favorecer la mezcla turbulenta sobre los niveles básicos del océano.

El límite superior de la capa de mezcla del fondo se considera como el límite de espesor de la capa de transición del fondo. A diferencia de la atmósfera, las aguas de fondo del océano no están estratificadas por densidades o, como máximo, presentan una estratificación estable en grado muy leve (el agua más fría y salada por debajo de la menos salada y fría). En consecuencia, las perturbaciones no se desarrollan del mismo modo que lo hacen en la atmósfera. Cualquier estratificación estable serviría para disminuir el espesor de la capa de mezcla al necesitar más energía para conseguir la mezcla.

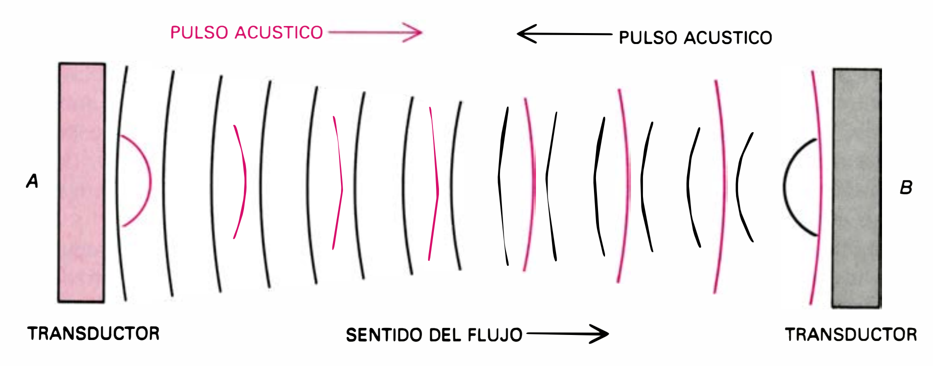
Solamente la energía que alcanza el fondo del mar puede causar erosión. Cuanto más abrupta sea la topografía a pequeña escala del lecho marino y más rápido el flujo suprayacente, mayor es la fuerza de fricción que actúa sobre los sedimentos del fondo. Por encima del valor crítico de la fricción que es exactamente capaz de iniciar el proceso de



5. EL TRANSMISOMETRO es uno de los instrumentos utilizados por los investigadores del HEBBLE. La cantidad de luz que alcanza el fotodiodo de la derecha está en estrecha relación con la concentración de partículas interceptadas por la luz. La fuente luminosa emite a una longitud de onda de 660 nanómetros.



6. SISTEMA DE DISPERSION DEL SONIDO REFLEJADO, otra fuente de información sobre la concentración de partículas en el agua que fluye cerca del fondo oceánico. El instrumento emite pulsos de sonido y mide la cantidad de energía reflejada por las partículas existentes en un volumen dado de agua.



7. PARA DETERMINAR la velocidad y la fuerza de flujo se mide el tiempo que tarda un impulso sonoro en recorrer una distancia conocida. Los investigadores del HEBBLE llaman al instrumento, cuyo esquema se muestra, sensor de tensión acústica del fondo. Si la corriente fluye hacia la derecha, el tiempo que tarda un impulso en ir de *A* a *B* será menor que el necesario para recorrer el camino en sentido opuesto. La diferencia da la velocidad del fluido. La cantidad conocida como tensión de Reynolds en la masa de agua investigada se calcula a partir de dos medidas tomadas perpendicularmente, en un ángulo recto entre sí.

erosión, la velocidad de la erosión aumenta exponencialmente al crecer el rozamiento. Una vez que los sedimentos se desprenden del lecho marino están sometidos a fuerzas opuestas: la turbulencia tiende a difundir las partículas hacia arriba y la gravedad las hace descender. Cuanto mayor es la velocidad de sedimentación, más intenso es el gradiente de concentraciones cerca del fondo. Cuanto más fuerte es la corriente y más abrupto el lecho marino, tanto más uniformemente varía la concentración con la altura sobre el fondo. Los sedimentos de las profundidades suelen ser de arcillas y materiales finos cuyo tamaño de partícula no llega a los 30 micrometros. Estas partículas tienden a sedimentar con una lentitud tal que las concentraciones de sedimento son casi uniformes en toda la capa mezclada del fondo en presencia de corrientes moderadas. Como consecuencia de ello, el material muy fino, una vez que se halla en suspensión por efecto de una intensa tormenta de profundidad, puede ser transportado a grandes distancias por acción de corrientes débiles, en comparación.

Las partículas sedimentarias finas tienen un cociente superficie/volumen elevado, lo que significa que son extraordinariamente eficaces en la adsorción de sustancias disueltas en el agua donde se encuentran mezcladas. Las arcillas naturales, por ejemplo, poseen un área superficial de 100 metros cuadrados por gramo de sedimento. Entre las sustancias excavadas por las corrientes de fondo se encuentran isótopos radiactivos, naturales y artificiales, de distintos elementos químicos. Si la tasa de entrada de isótopos, procedentes de fuentes de radiactividad natural, y la tasa de sedimentación son aproximadamente constantes, como parece ocurrir con muchos isótopos en distintos lugares de las profundidades marinas, la tasa de disminución de la radiactividad con la profundidad en los sedimentos sirve de reloj natural para estimar las tasas de sedimentación.

Si suponemos que los sedimentos no se mezclan después de su deposición, la concentración de un isótopo radiactivo adsorbido crecerá exponencialmente con la profundidad a una velocidad inversamente proporcional a su vida media. Los isótopos naturales comúnmente estudiados en estas cronologías sedimentarias tienen vidas medias que van de 24,1 días (el torio 234) a 5730 años (el carbono 14). También son útiles para obtener una datación absoluta de las capas sedimentarias varios isótopos radiactivos introducidos por explo-

siones atómicas en la atmósfera; entre ellos: cesio 137 (vida media 30,1 años), plutonio 239 (24.000 años) y plutonio 240 (6580 años).

Aunque la mezcla de sedimentos complica los cálculos de la tasa de sedimentación neta, permite sacar otras conclusiones. Los 10 centímetros superiores de la mayoría de sedimentos a cualquier profundidad están más o menos continuamente mezclados por las actividades de alimentación y excavación de los organismos que viven en ellos. Los organismos que habitan en el fondo configuran, en buena parte, la topografía a pequeña escala y son causa de los "pegamentos" biológicos (así el mucus), que afectan tanto a la cantidad de rozamiento de fluido aplicada al fondo como a la efectividad de ese rozamiento en la erosión de los sedimentos. La mayoría de los animales que agitan el fondo se alimentan digiriendo bacterias y otros componentes orgánicos de los sedimentos, igual que las lombrices en nuestros suelos.

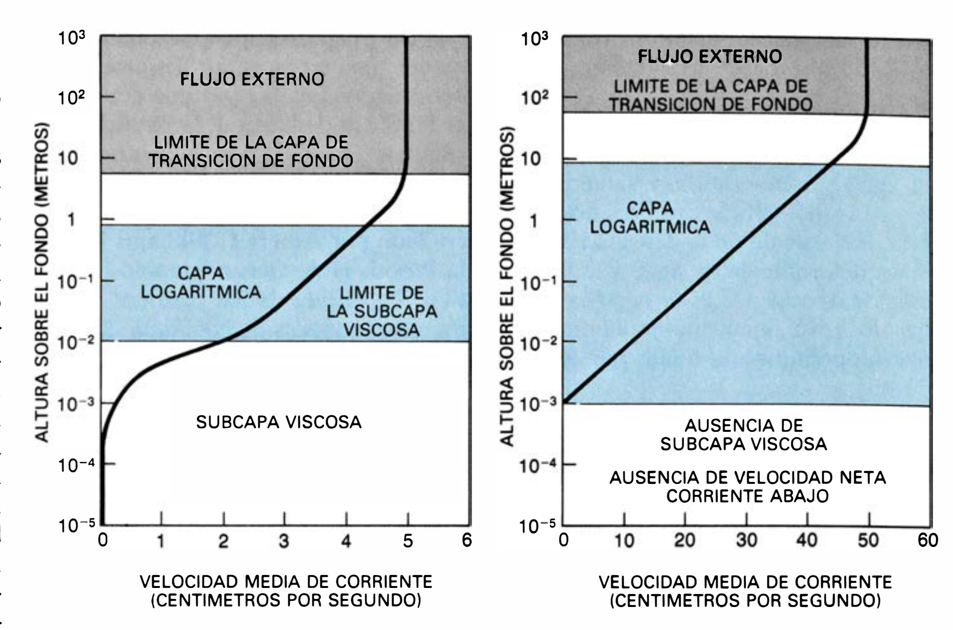
La abundancia de esos organismos suele decrecer con la profundidad del agua y la lejanía de la costa, siguiendo fielmente el propio patrón de la tasa de sedimentación. La acumulación neta de sedimento disminuye desde unos pocos centímetros cada 1000 años a profundidades de 1000 metros hasta unos pocos milímetros cada 1000 años en mar abierto. Escogiendo razonablemente los isótopos radiactivos con vidas medias adecuadas, se puede calcular la profundidad de la capa de mezcla biológica y la intensidad de dicha mezcla. Dos isótopos con diferente vida media no darán, por lo general, perfiles de idéntica forma en condiciones estacionarias de mezcla biológica.

Para la escala temporal en que se desenvuelven los isótopos radiactivos empleados en estratigrafía, la erosión física y la redeposición resultan casi instantáneas. Por tanto, una capa redepositada mostrará concentraciones uniformes de todos los isótopos en todo su espesor. Así pues, es posible, en principio, estimar la profundidad de un depósito afectado por tormentas de profundidad y, comparando los perfiles de dos o más isótopos, distinguir los pulsos de mezcla física de la mezcla biológica, que es más constante.

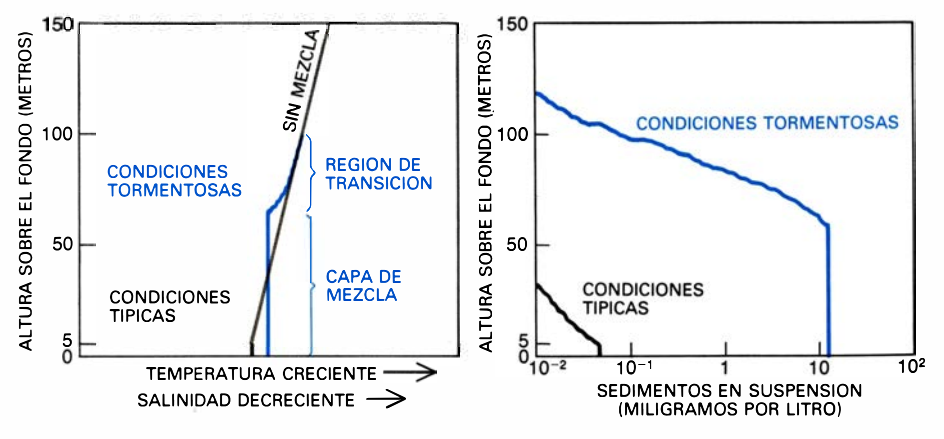
Estas interpretaciones se tornan más complejas por el hecho de que la redeposición física deja con frecuencia capas de sedimento ordenadas por tamaños de partícula, donde las partículas mayores y que sedimentan antes tienen menor área superficial y, por tanto, menor concentración de isótopos adsorbidos. No es fácil sacar muestras inmediatamente después de una tormenta; así pues, la mezcla biológica del depósito producido por la tormenta modificará considerablemente los rasgos de ésta.

Se puede inferir la mezcla del sedimento de la presencia de gránulos fecales, trazas de actividades de alimentación y huellas del paso de los organismos del fondo. Como sus actividades destruyen rápidamente los lechos en gradación producidos por el flujo de materiales, podemos concluir que los rasgos de un lecho (por ejemplo, un surco) que aparecen en una fotografía del fondo marino no son características antiguas sino de reciente creación.

A las profundidades que alcanza el suelo marino es difícil realizar observaciones de cualquier clase. Los instrumentos utilizados para observar las intensas tormentas abisales deben ser no sólo lo bastante fuertes como para soportar una presión de unos 48.263 kilonewton por metro cuadrado, sino también lo suficientemente robustos para soportar las importantes fuerzas de arrastre ejercidas por las corrientes de fondo. A fin de caracterizar las tormentas abisales y sus consecuencias, los investigadores participantes en el progra-



8. PROPIEDADES DE LA MASA DE AGUA (salinidad, temperatura y sólidos en suspensión), activamente mezcladas en la capa "logarítmica", donde la velocidad media aumenta linealmente con la altura cuando representamos la altura sobre el fondo en escala logarítmica. Con un flujo lento y fondo liso (*izquierda*), se moverá una fina capa de agua sobre el fondo con flujo viscoso, o laminar. Pero si se trata de un flujo rápido, o el fondo es accidentado (*esquema de la derecha*), la capa logarítmica se extenderá sin interrupción desde un milímetro hasta una altura de unos 10 metros por encima del suelo marino.



9. LA PRESENCIA DE TORMENTAS afecta a la distribución de salinidad, temperatura y cantidad de materia en suspensión en función de la altura sobre el fondo del océano. Como la salinidad y la temperatura responden de modo similar, se representan, a la izquierda, por una sola curva. En condiciones típicas de flujo abisal (*negro*) las dos propiedades aumentan linealmente con la altura sobre el fondo, excepto en los cinco metros más bajos, donde se mezclan dando un valor básicamente constante. En condiciones tormentosas (*color*) llega al flujo abisal la suficiente energía para ampliar la capa de mezcla hasta una altura de 60 o 70 metros, con una región de transición que se extiende unos 30 metros por encima de aquélla. A la derecha se representa el efecto que las tormentas ejercen sobre el sedimento suspendido en las aguas de fondo. Las condiciones típicas se muestran en negro; las tormentosas, en color.

ma HEBBLE han diseñado instrumentos robustos que miden las siguientes variables: velocidad y fuerzas en el fluido que actúa removiendo el sedimento del fondo, concentración de sedimento en el agua y temperatura y salinidad de ésta. Los dos últimos valores nos posibilitan el cálculo de la densidad de una masa determinada de agua y la deducción de su origen. Las fotografías seriadas nos revelan cuán alterada quedó la microtopografía del fondo por el paso de una tormenta. El efecto de las tormentas sobre las características biológicas y químicas del sedimento se determina a través del análisis de los materiales extraídos con cilindros.

Para medir las velocidades de las corrientes utilizamos rotómetros similares a los anemómetros con que se precisa la velocidad del viento en los aeropuertos, pero mucho más fuertes. Estos registran internamente la dirección y la velocidad de la corriente, promediadas sobre intervalos de tiempo seleccionados. Habitualmente, se coloca seis o siete currentímetros a distintos niveles situados a lo largo de un cable vertical anclado al fondo y mantenido en pie mediante boyas. La batería de instrumentos puede recuperarse entera mediante un mecanismo acústicamente controlado. Las fuerzas que actúan en el fluido se deducen del cálculo de los cambios en el tiempo necesario para que un impulso sonoro atraviese una distancia conocida. En el sistema desarrollado por Albert J. Williams III, de la Woods Hole Oceanographic Institution, la medida de los períodos de los impulsos sonoros da cuenta de las tres componentes espaciales de la velocidad cinco veces por segundo, permitiendo la resolución de las fluctuaciones de velocidad que representan turbulencia en el flujo.

Las medidas de temperatura y salinidad cerca del fondo del mar son difíciles porque las variaciones que sufren dichas propiedades son muy pequeñas: menores de 50 miligrados Celsius de temperatura y 0,1 partes por 1000 de salinidad. La temperatura se mide con termistores cuidadosamente calibrados y, la salinidad, con sondas sensibles a la conductividad eléctrica del agua. La concentración de sedimento suspendido puede medirse directamente tomando muestras de agua en botellas. Sin embargo, para medidas de rutina que se hacen a lo largo de días o semanas, recurrimos a métodos acústicos y ópticos. El barrido por ondas sonoras de alta frecuencia puede analizar la estructura de las nubes de sedimento. Las medidas de atenuación de la luz dan una indicación exacta de la concentración de los sedimentos que se cruzan en el camino de la luz.

Se puede obtener imágenes detalladas del fondo marino mediante un sistema de estereocámara de alta resolución. Para hacer un mapa de áreas más extensas se sitúa un sistema de sonar de barrido lateral 50 metros por encima del fondo. Otros instrumentos empleados para examinar el campo de flujo y el lecho marino incluyen un velocímetro Doppler de láser, desarrollado en Woods Hole por Yogesh C. Agrawal. Este instrumento mide la velocidad en los 50 centímetros por encima del fondo, en un perfil continuo, mediante barrido óptico con un rayo láser y medición del cambio de frecuencia en la luz reflejada por las partículas que se mueven atravesando el rayo.

Con la ayuda de todos estos instrumentos comenzamos a estudiar corrientes abisales en el emplazamiento del HEBBLE, en el Atlántico Norte, en 1979. Durante las tormentas de profundidad, la velocidad de las corrientes de fondo puede aumentar de una décima de nudo a un nudo o más. Simultáneamente, la concentración de sedimento en suspensión se multiplica por 10 o 100. El aumento de concentración del material suspendido en una tormenta muestra patrones variables, que recuerdan las manchas grises que aparecen en una nube de lluvia activa. La nube móvil de sedimento suspendido exhibe manchas aparentemente coherentes con una vida de 20 minutos, que corresponden a una dimensión lineal de 500 metros. Esta es unas diez veces el espesor de la capa de mezcla del fondo durante una tormenta. Si nos basamos en los experimentos de laboratorio, la escala de longitud de 500 metros es lo que aproximadamente podemos predecir para la turbulencia a gran escala en la capa de transición. Durante una tormenta, el nivel de mezcla local cerca del fondo aumenta bruscamente, acompañado por una intensificación de la energía turbulenta a través de la capa de transición del fondo, y mantiene el sedimento en suspensión.

Las tormentas que hemos observado duran de unos pocos días a dos semanas, al final de cuyo período la velocidad de la corriente cae rápidamente a unos 5 centímetros por segundo (aproximadamente 0,1 nudos), con una dis-

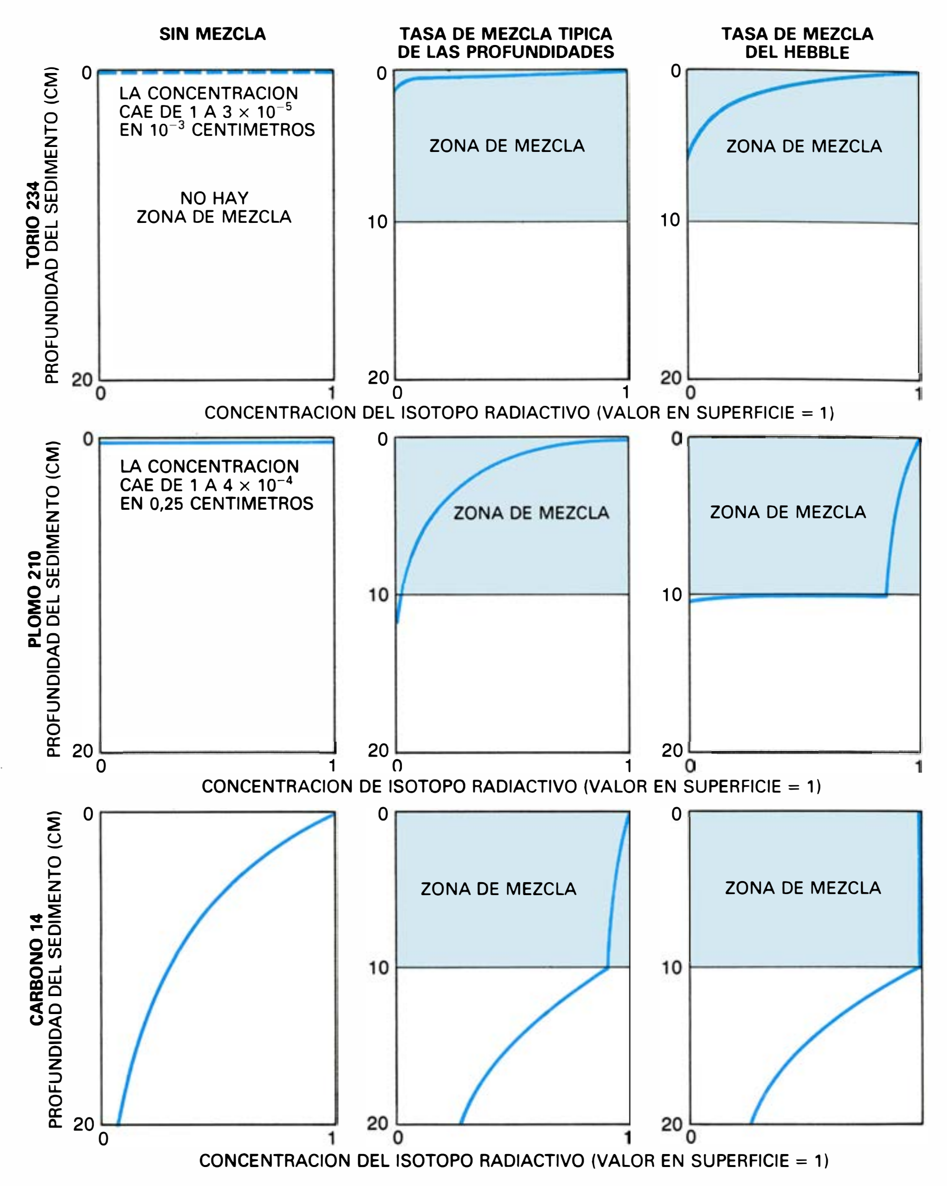
10. RAPIDOS CAMBIOS en la temperatura (*negro*) y transmisión de la luz (*color*), registrados en el intervalo de una hora en la zona del HEBBLE en condiciones de tormenta. La transparencia del agua varía con la concentración de sólidos suspendidos, lo que revela cambios en sedimento arrastrado por el flujo.

minución paralela de la concentración de sedimento en suspensión. La tasa de decrecimiento de la concentración de sedimento suspendido significa que todas las partículas, excepto las más finas, sedimentan antes de lo que cabría esperar de sus velocidades individuales de sedimentación, ayudadas aparentemente por la coagulación de partículas en la nube. El desencadenamiento de tormentas de profundidad es tan impredecible como el comienzo de tormentas atmosféricas. Sorprende que la circulación en las profundidades oceánicas, a diferencia de la circulación atmosférica, no muestre un patrón estacional bien definido. De momento sólo podemos afirmar que las tormentas de profundidad suelen presentarse a intervalos de dos a tres meses.

La turbulencia que las tormentas generan en la capa de transición disipa energía muy deprisa. La velocidad con que la energía mecánica se disipa en forma de calor alcanza valores de una centésima de watt por metro cuadrado de fondo marino, valores que sólo se superan en estuarios someros y en la plataforma continental cuando fuertes olas y corrientes interactúan cerca del fondo. ¿De dónde procede toda esa energía?

Hay dos fuentes de energía: una es la fuerza, aproximadamente constante, asociada a la circulación termohalina; la otra parece relacionarse con los remolinos expulsados por la corriente del Golfo, hacia la superficie. Georges L. Weatherly, de la Universidad estatal de Florida, ha conseguido reunir datos demostrativos de una fuerte correlación entre la presencia de remolinos de núcleo caliente expulsados de la corriente del Golfo y la presencia de tormentas tres millas al sur, en el emplazamiento del HEBBLE. Si podemos extender estos resultados a otras áreas, cabría utilizar mapas de distribución de los remolinos superficiales –que pueden deducirse de las mediciones por satélite de las variaciones en la altitud de la superficie marina– para identificar otras regiones del fondo marino que tienen probabilidad de sufrir erosión activa por las tormentas.

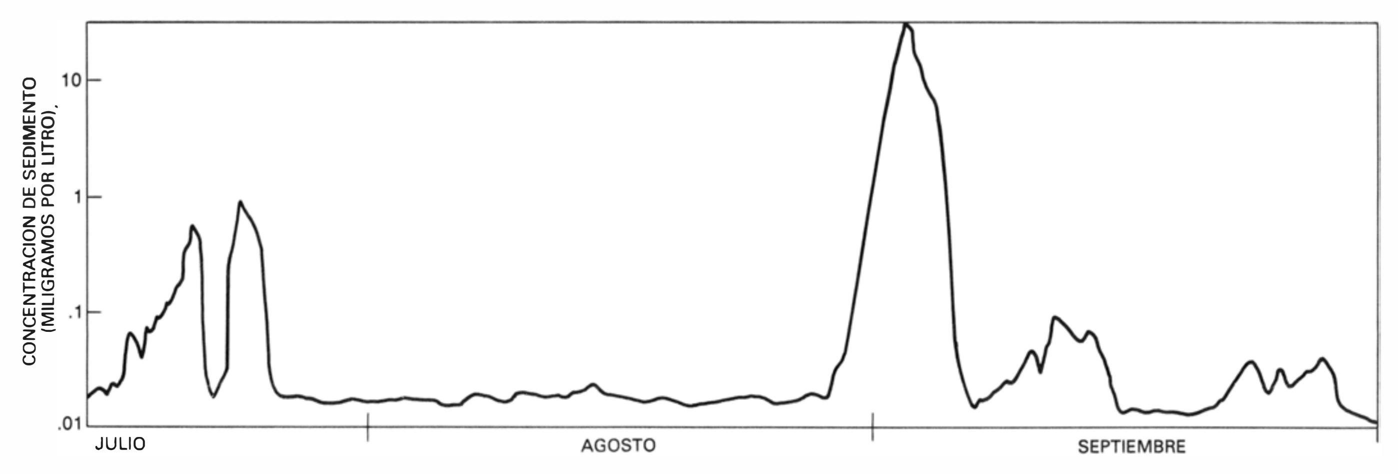
En un futuro próximo, en colaboración con Nelson G. Hoog de Woods Hole, esperamos instalar una serie de currentímetros que cubran un área suficiente para estimar directamente las frecuencias y las dimensiones espaciales de los remolinos que van hacia el fondo. Hasta ahora, algunos estudios limitados de turbidez realizados por J. Ronald V. Zaneveld y Hasong J. Pak, de la Universidad estatal de Oregon, sugieren que las manchas turbias de agua arrastrada hacia arriba por las tormentas de profundidad se extienden quizás a una distancia de 30 kilómetros, escala razonable para los remolinos oceánicos. No existen datos de las dimensiones de las tormentas en dirección perpendicular a las corrientes. Pero es probable que no lleguen a los 30 kilómetros, porque los remolinos tienden a alargarse en la dimensión paralela a las líneas de corriente.



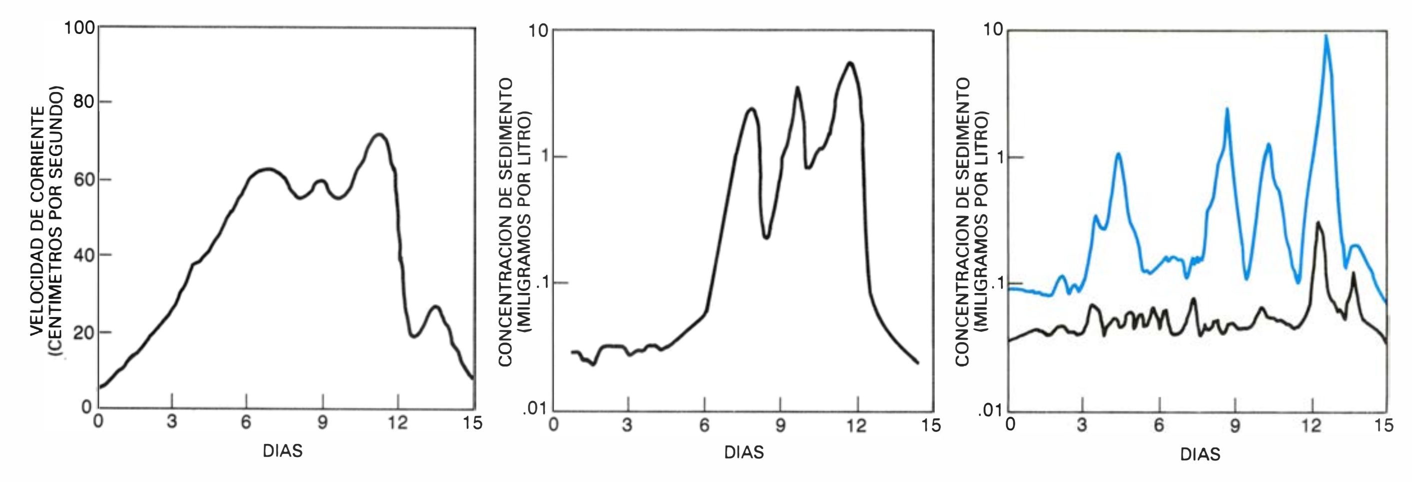
11. DISTRIBUCION de isótopos radiactivos en los sedimentos. Nos indica la intensidad de la mezcla llevada a cabo por corrientes y organismos. Las nueve curvas muestran la distribución de tres isótopos de vidas medias diferentes cuando no hay mezcla (*izquierda*), cuando existe la tasa de mezcla típica de las profundidades (*centro*) y cuando están sujetos a tasas de mezcla, cien veces mayores, en la zona del HEBBLE (*derecha*). La vida media del torio 234 es de 24,1 días, la del plomo 210 es de 21 años y la del carbono 14, de 5730 años. (El sedimento se acumularía a una velocidad de un centímetro cada 1000 años.)

Aunque el paso de agua turbia queda recogido por las medidas de los turbidímetros, no podemos decir si en un lugar dado a corto plazo habrá erosión neta de material, una deposición o un cambio sin importancia. Una erosión importante a corto plazo puede estar exactamente equilibrada por la deposición. Las suspensiones más densas de sedimentos observadas hasta ahora en el experimento HEBBLE alcanzaron 12 miligramos de sólidos por litro, unas 250 veces el valor típico de las profundidades marinas. Si suponemos que la capa turbia tenía 60 metros de espesor, las partículas en suspensión habrían originado una capa de sedimento de medio centímetro de espesor, en la hipótesis de que se depositasen en el fondo uniforme y simultáneamente. Considerado de otro modo, si estimamos que la corriente turbia medía cinco kilómetros de anchura, la cantidad de sedimento transportado a través de la sección transversal de la tormenta por minuto excedería de seis toneladas métricas.

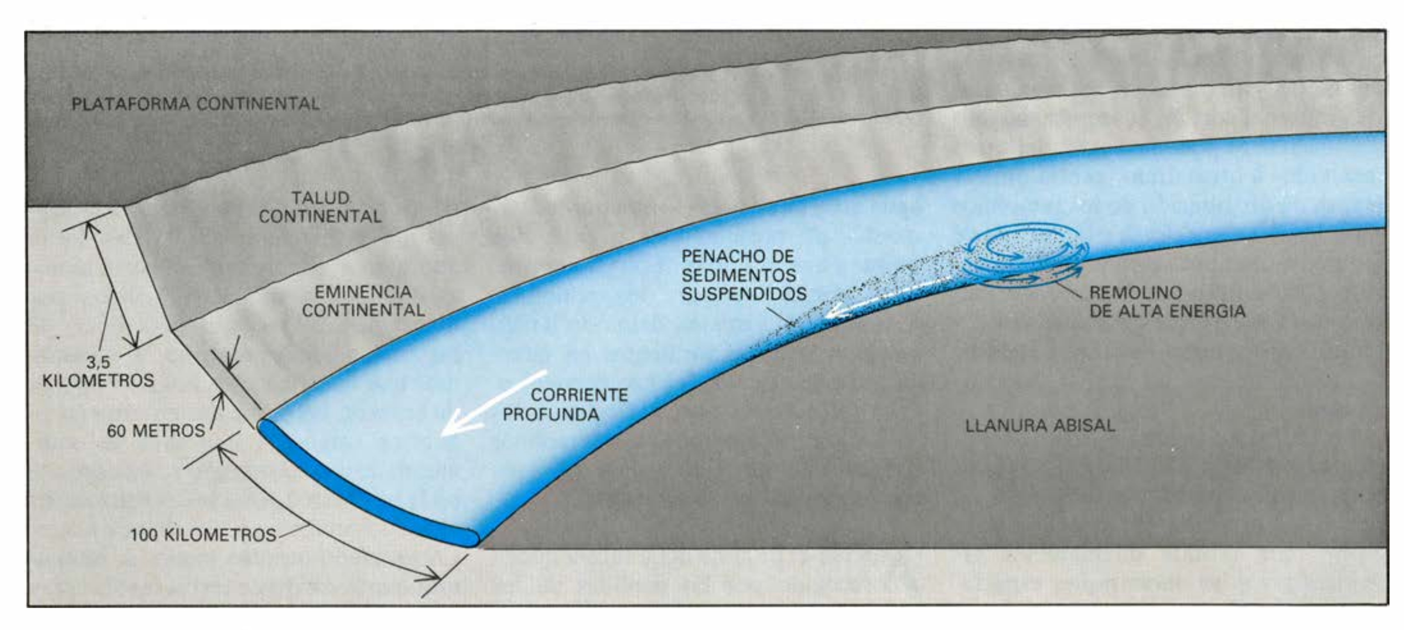
Si la tormenta hubiera depositado



12. VARIO LA CONCENTRACION DE SEDIMENTO en un factor de casi 1000 a un metro sobre el nivel del fondo, a lo largo de 10 semanas en la zona del HEBBLE. Los picos coincidieron con fuertes tormentas observadas en la base de la eminencia continental a finales de julio y principios de septiembre.



13. DURANTE UNA TORMENTA que duró una semana, la velocidad del flujo de fondo (*izquierda*) aumentó casi diez veces, superando por breve tiempo los 60 centímetros por segundo (1,17 nudos). Simultáneamente, la concentración de sedimento en la corriente alcanzó un máximo de 100 veces la concentración básica (*centro*). Las medidas realizadas en un corto período (*derecha*) muestran cómo la concentración de sedimento fluctúa a dos metros sobre el fondo (*negro*), y, con mayor amplitud, medio metro por encima del mismo (*color*), al ser arrastrado y pasar por la zona de los transmisómetros.



14. REMOLINO A ESCALA MEDIA, esquematizado en su interacción con la corriente abisal en la base de la eminencia continental, 450 millas mar adentro de la costa de Nueva Inglaterra. La corriente se comprime hacia la eminencia por la fuerza de Coriolis. Estos remolinos, o tormentas, parecen correlacionarse con la presencia de remolinos a escala media expulsados por la corriente del Golfo. El remolino abisal toma la forma de una elipse que midiera unos 30 kilómetros de longitud y, quizá, de cinco kilómetros de anchura; no se conoce, empero, su altura. La coincidencia del remolino y la corriente media abisal socava el fondo, recogiendo lodo, arrastrándolo corriente abajo y redepositándolo posteriormente en acúmulos de sedimento.

una capa reciente de sedimento de medio centímetro de espesor en el emplazamiento del HEBBLE, habría igualado la cantidad neta depositada normalmente en 500 años, de acuerdo con la determinación de isótopos radiactivos de vida larga. Esta tasa de sedimentación coincide con otras estimaciones de la deposición a lo largo de la eminencia continental. Sin embargo, cuando se determina la concentración de isótopos de vida corta en los sedimentos del HEBBLE surge una imagen bastante diferente. El cesio 137, que apareció en las explosiones atmosféricas de bombas atómicas hace sólo 30 años, se ha mezclado ya hasta profundidades de 12 centímetros. El torio 234, de sólo 24,1 días de vida media, puede detectarse incluso a siete centímetros por debajo de la superficie del fondo marino.

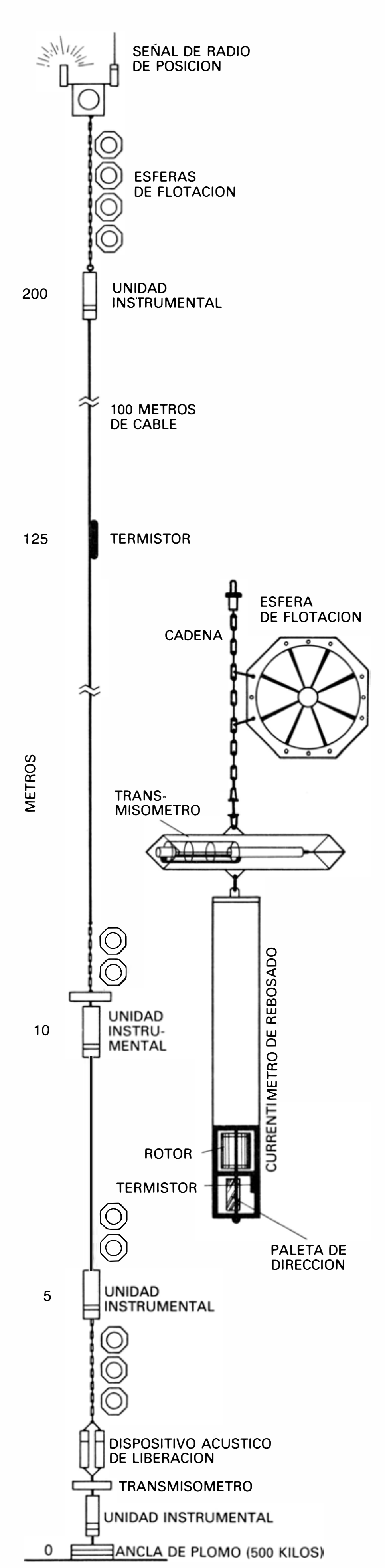
Estos estudios, realizados por David J. DeMaster y Charles A. Nittrouer, de la Universidad estatal de North Carolina, sugieren que las tasas de mezcla centuplican, en la zona de investigación del HEBBLE, las que se producen en zonas profundas típicas y libres de tormentas. Las tormentas abisales y los organismos que viven en el fondo actúan de consuno para mezclar intensamente los sedimentos que se acumulan poco a poco. Queda por conocer la contribución relativa de cada una de estas fuerzas; de acuerdo con una estimación provisional, las tormentas son responsables de la mezcla en mayor medida que los organismos. Los organismos parecen ser bastante sedentarios y bien adaptados a recoger nutrientes del agua que pasa por sus proximidades, más que a excavar en busca de alimento.

Hasta ahora, el programa HEBBLE ha dedicado mayor esfuerzo a la observación que a la experimentación. El resultado provisional obtenido acerca de las relaciones entre fuerza del flujo, erosión y deposición debe comprobarse mediante experimentos antes de que pueda tomarse como definitivo, o ser reemplazado por otro más exacto. Con alguna seguridad, conocemos sólo las características de erosión y deposición en zonas arenosas de agua somera. La respuesta de los lechos fangosos profundos al flujo de agua sobre ellos está afectada por las fuerzas físicas que se les imponen y por los efectos de los organismos sobre su microtopografía y su capacidad de adhesión. Puesto que el fenómeno no se puede simular en el laboratorio, se necesita un experimento de campo. No queda otra solución que recurrir a la experimentación *in situ* para desentrañar el complejo juego mutuo entre la fuerza del flujo, la tasa y la profundidad de erosión, la tasa de deposición y la distribución de los isótopos radiactivos.

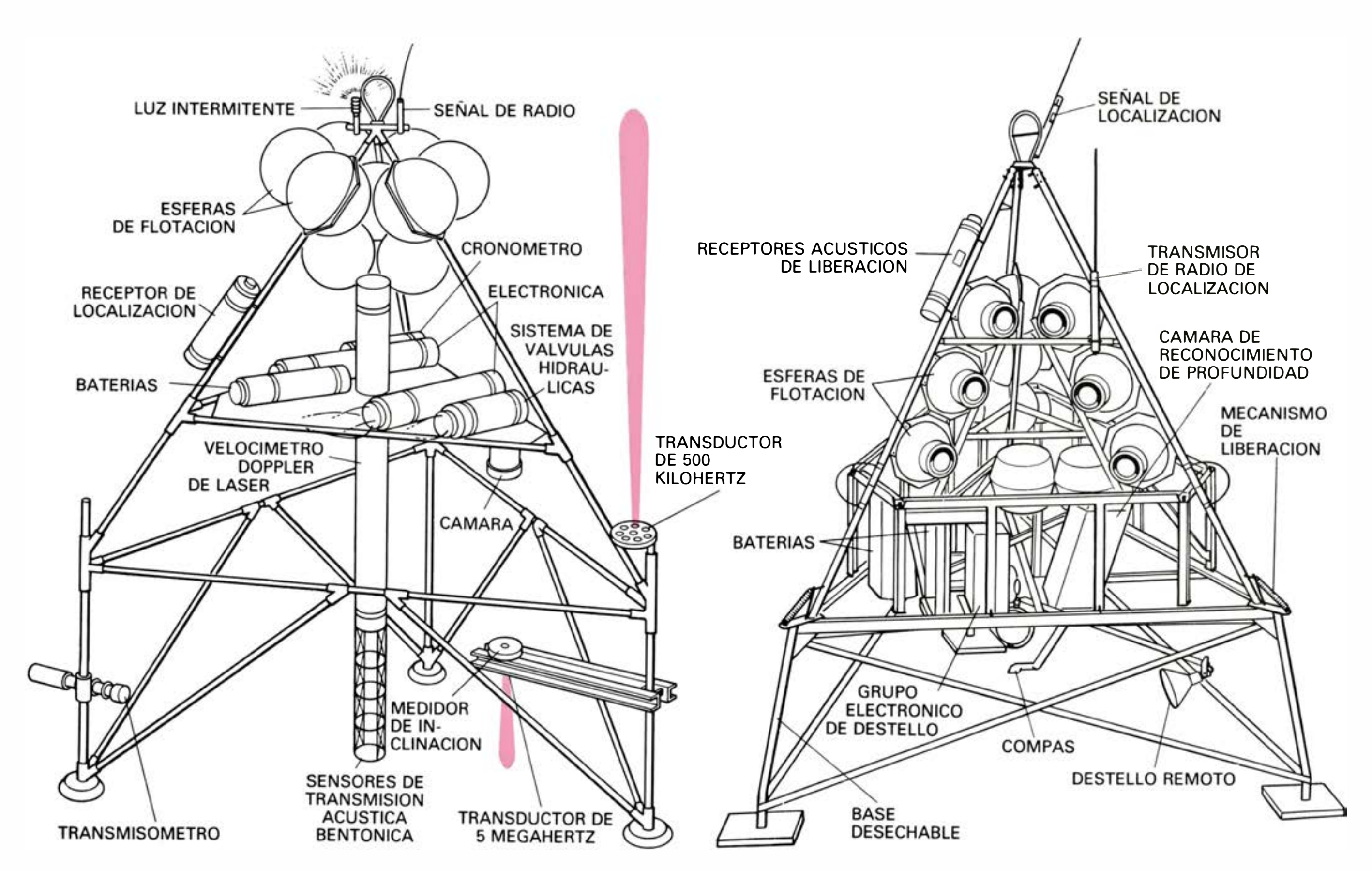
A este fin, uno de nuestros colegas en Woods Hole, Clifford L. Winget, ha diseñado un instrumento especial que, colocado sobre el fondo del mar, puede ejercer fuerzas conocidas y controladas sobre los sedimentos del fondo. El instrumento hará circular una muestra de agua del fondo a varias velocidades constantes a través de su sección expuesta, aunque confinada, de suelo marino. Las fuerzas del fluido y el número de partículas puestas en circulación por el fluido los medirán un anemómetro especial de láser diseñado para registrar el efecto Doppler en la luz reflejada por las partículas en suspensión que se mueven con el flujo de agua. La puesta en marcha del instrumento, denominado SeaDuct, está prevista para este año.

El reconocimiento de que las corrientes de fondo pueden capturar y redistribuir los sedimentos está provocando que los geólogos reexaminen sus ideas sobre lugares de búsqueda de nuevas reservas de petróleo. Desde hace tiempo se sabe que las grandes concentraciones de éste dependen de la presencia de ciertas condiciones geológicas: una fuente sedimentaria de petróleo, una roca porosa que sirva de depósito y algún tipo de dique o estructura de contención. Generalmente, la fuente la constituye el carbono orgánico sobre sedimentos de grano fino, ricos en carbono. El depósito lo proporciona, con frecuencia, la roca porosa y sedimentaria, como la piedra arenisca. Diversas estructuras geológicas pueden servir de diques para el depósito de petróleo.

Según la idea convencional, la mayor fuerza que actúa sobre los sedimentos es la gravedad. Desde hace mucho tiempo se ha dado por cierto que todo sedimento se mueve inexorablemente pendiente abajo. Aunque esto sea probablemente verdad para la arena gruesa y la grava, parece ser que los materiales de grano fino pueden ser transportados a grandes distancias por



15. SISTEMA de instrumentos anclados para estudiar las corrientes de fondo en el programa HEBBLE. Consta de una serie de siete unidades instrumentales para medir la velocidad de corriente, la temperatura y la transmisión de luz (índice de concentración de sedimentos) a diferentes distancias del fondo: a menos de un metro y a 5, 10, 30, 60, 125 y 200 metros. Los cables se acercan a los 210 metros de altura y se sitúan a distancias de 100 kilómetros entre sí. Para recuperarlos se recurre a un mecanismo acústico situado cerca del ancla.



16. DOS CLASES DE TRIPODE DE INSTRUMENTOS, desarrolladas por los investigadores del HEBBLE para estudiar las corrientes de fondo y la topografía del suelo marino. El trípode de la izquierda soporta tres sistemas de medida. Los sensores de tensión acústica determinan la variación temporal y espacial de la velocidad y las fuerzas de turbulencia en las corrientes de fondo mediante la medida de las variaciones en el tiempo necesario para que un impulso sonoro atraviese una distancia conocida. Un velocímetro Doppler de láser determina también las velocidades de la corriente midiendo el efecto Doppler en la luz reflejada por las partículas en movimiento. Un tercer sistema mide la concentración de sedimentos en suspensión registrando la dispersión de las ondas sonoras reflejadas a partir de las que se emiten a dos frecuencias: cinco megahertz y 500 kilohertz. El segundo tipo de trípode (*derecha*) porta una estereocámara fotográfica de alta resolución programada para tomar fotografías cada 30 minutos. Ambos trípodes se recuperan.

las corrientes de fondo. Posiblemente, la mayor parte de la materia orgánica capaz de formar petróleo se concentra en finas partículas que se originan principalmente en las aguas superficiales. Cuando estos materiales se depositaron en el fondo de la parte occidental de las antiguas cuencas oceánicas, bien pudieron ser transportados paralelamente a los contornos de la cuenca, o en direcciones que formasen ángulo recto con las que comúnmente se aceptan.

Para que la materia orgánica se transforme en petróleo se cree que se necesita, al menos, una de las dos condiciones siguientes: una tasa de acumulación muy alta o escasez de oxígeno en el agua del fondo, de suerte que la materia orgánica no pueda oxidarse antes de quedar enterrada. Si los petrogeólogos pudieran conocer en qué lugares prevaleció una de estas condiciones –o, preferiblemente, ambas– en los antiguos mares, les sería mucho más fácil encontrar nuevos yacimientos de petróleo. Las zonas donde las tormentas de fondo indujeron elevadas tasas de acumulación de sedimentos ricos en materia orgánica deberían proporcionar sitios favorables para la formación de rocas ricas en petróleo. De acuerdo con esto, el geólogo debería buscar en las paleopendientes rocas sedimentarias de grano grueso y en las paleocorrientes, sedimentos ricos en carbono.

El reciente conocimiento de las tormentas abisales ofrece una inmediata aplicación práctica a los ingenieros, responsables de la estabilidad de cables y estructuras emplazadas sobre el fondo del océano. Las fotografías submarinas han demostrado que las corrientes socavan los sedimentos alrededor de los cables submarinos, dejándolos suspendidos entre zonas no erosionadas del lecho marino. En algunos casos, el subsiguiente balanceo del cable en el seno de la corriente ha provocado su rotura.

La existencia de tormentas abisales también plantea nuevos problemas para el personal dedicado a la defensa antisubmarina. El ruido asociado con grandes tormentas turbulentas puede confundir los dispositivos pasivos de escucha situados en el fondo para detectar el paso de submarinos. En consecuencia, sería posible fabricar submarinos que suenen como las propias tormentas, haciéndolos muy difíciles de detectar en regiones de alta energía, como el Atlántico Norte occidental.

Quizás el problema más importante planteado por la existencia de tormentas abisales es su efecto potencial sobre los desechos tóxicos depositados en fosas marinas. Antes de escoger el fondo oceánico como vertedero final para cualquier desecho peligroso es esencial contar con predicciones fiables sobre las condiciones a largo plazo que convergerán en el fondo elegido. Si el método de vertido es el encierro en barriles, el lugar para efectuarlo debe ser una región donde el transporte de sedimento no sea apreciable. Por otro lado, si la estrategia de vertido es la dilución y dispersión, las áreas donde se desarrollan tormentas pueden ser las más adecuadas. En cualquier caso, debemos saber que algunas sustancias tóxicas son fácilmente adsorbidas en las finas partículas en suspensión y pueden, por ello, entrar fácilmente en la cadena de alimento de los organismos bentónicos. Estos son solamente algunos de los problemas planteados por el estudio de las corrientes y tormentas abisales en un rincón del océano.

Control genético de un comportamiento innato

Con técnicas de ADN recombinante se ha definido una familia de genes que determinan un conjunto de neuropéptidos relacionados, cuya liberación rige una pauta de comportamiento: la puesta de huevos en un caracol marino

Richard H. Scheller y Richard Axel

Ciertos patrones estereotipados del comportamiento animal son innatos. Se han conformado evolutivamente y se heredan generación tras generación. Sin que la experiencia o el aprendizaje los modifiquen sustancialmente, los poseen todos los individuos de unas especies y no los de otras. Los etólogos han descrito esa serie de comportamientos innatos estereotipados con el nombre de "pautas de comportamiento": patrones de conducta que constan de varios elementos independientes que, o bien forman conjuntamente una secuencia coordinada, o no se dan. Todo animal hereda una colección singular de esas pautas de comportamiento, que caracteriza la conducta de su especie.

¿Cómo hereda un animal tal repertorio de comportamientos? ¿Qué hereda en realidad? La respuesta es: ADN. Los genes pueden especificar el comportamiento estereotipado de dos maneras. En primer lugar, determinando una red precisa de células nerviosas y musculares interconectadas que se instalan y se van conectando a lo largo del desarrollo del animal. Un comportamiento estereotipado brota, sin embargo, en situaciones particulares o en determinados estadios del ciclo vital de un animal, y sólo por la actividad coordinada de ciertas partes del entramado de neuronas y células musculares. Además del entramado, los genes deben especificar, por tanto, elementos de control: sustancias que exciten, de una forma rígidamente determinada, conexiones específicas preexistentes, para generar, en el momento oportuno, una pauta de comportamiento.

Como biólogos moleculares estudiosos del sistema nervioso pretendemos identificar esos elementos de control y los genes que regulan su síntesis. Con ello esperamos conocer mejor los factores que participan en la generación de los repertorios del comportamiento innato, su desarrollo en diferentes especies y su evolución en el seno de una misma especie.

A diferencia de ciertos rasgos como el color de los ojos o los trastornos hereditarios de la hemoglobina, los comportamientos específicos no reflejan probablemente, de forma directa, el estado de ciertos genes. El sistema nervioso central integra y filtra las órdenes de los genes por procedimientos inaccesibles, en gran parte, al experimentador. Cuanto mayor es la complejidad de un sistema nervioso central tanto más esquiva es la relación entre un conjunto de genes (un genotipo) y los rasgos observables (un fenotipo). Resulta más fácil estudiar los genes que especifican el comportamiento en un organismo lo suficientemente complejo para que exhiba repertorios de comportamiento interesantes y, a la vez, lo bastante simple para que su comportamiento pueda atribuirse a células identificables. Hemos trabajado con un animal de esas características: el molusco *Aplysia*, un caracol marino sin concha que pesa de 2,5 a 4,5 kilogramos.

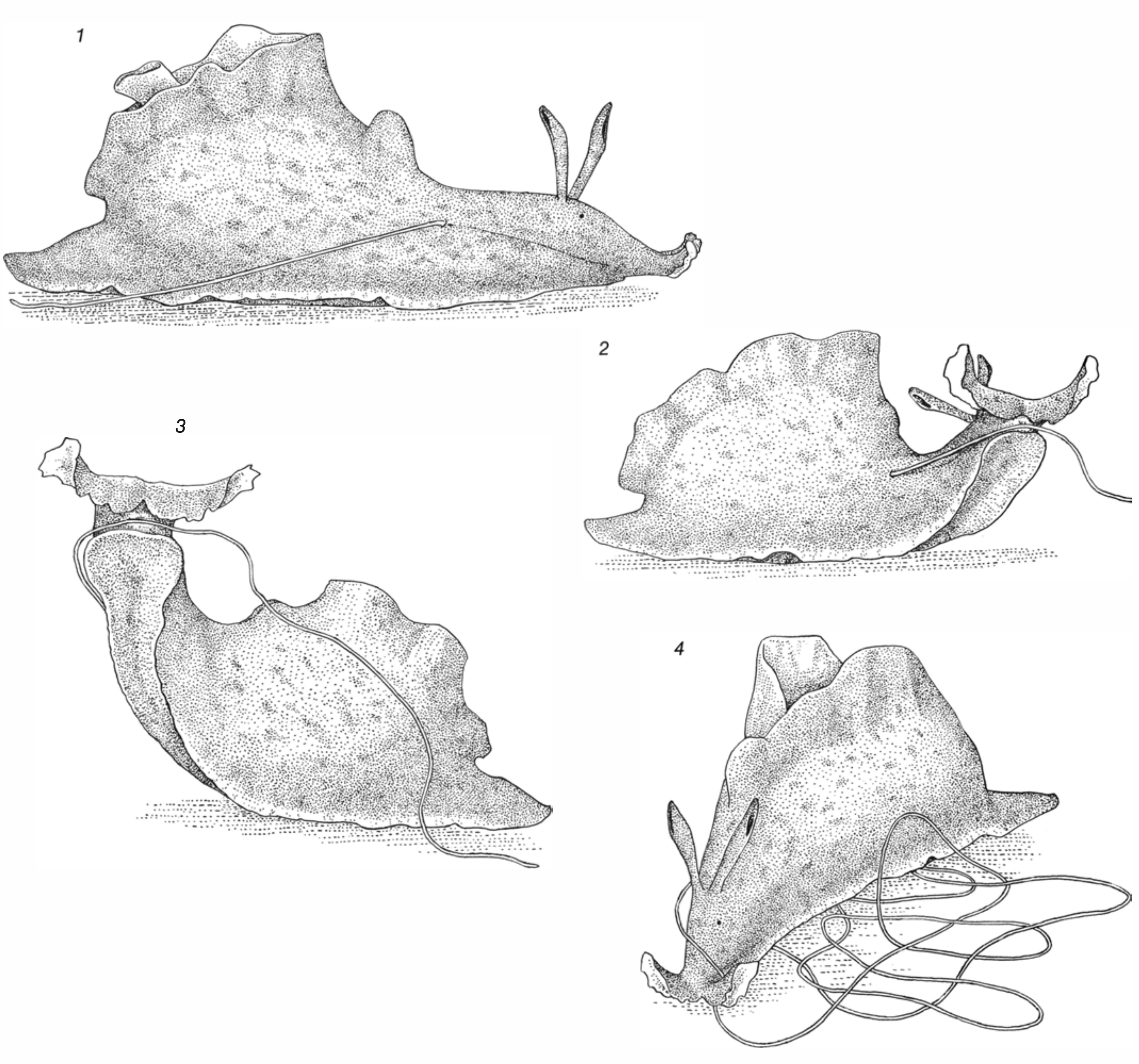
Si atendemos a los números, el sistema nervioso central de ese caracol es simple: consta de unas 20.000 neuronas agrupadas en cuatro pares de ganglios cefálicos y un ganglio abdominal. (Compárese con el cerebro de un mamífero, que tiene hasta un millón de veces esa cifra de neuronas.) Súmese a ello que las neuronas de *Aplysia* alcanzan diámetros de un milímetro, mil veces mayores que el de una célula típica del cerebro humano. La mayoría de estas meganeuronas contienen grandes cantidades de ADN: hasta un microgramo, cientos de miles de veces el ADN encerrado en una neurona típica de mamífero. Una sola gran célula de *Aplysia* puede, así, realizar las funciones que llevarían a cabo un gran conjunto de neuronas relacionadas en un sistema nervioso más complejo. Una serie de investigaciones, especialmente el elegante trabajo de Eric R. Kandel y sus colaboradores, de la Facultad de Medicina y Cirugía de la Universidad de Columbia, han relacionado patrones específicos de comportamiento del caracol con el funcionamiento de ciertas células. Nosotros y nuestros colaboradores nos hemos empeñado en el examen de la actividad de genes específicos en una sola célula y hemos asignado un patrón de comportamiento a la actuación de distintos genes.

La *Aplysia* adulta se ocupa, sobre todo, de procurarse el sustento y reproducirse. Ciertos aspectos del comportamiento reproductor del caracol aparecen fuertemente ritualizados, con una serie coordinada de patrones de comportamiento que dan cumplimiento al cortejo, apareamiento y puesta de huevos fecundados. Las *Aplysiae* son hermafroditas genuinos, individuos que realizan funciones de macho y hembra, la mayoría de las veces contemporáneamente; copulan en largas cadenas de seis individuos o más, formando incluso un círculo. La fecundación es interna; se produce en el tracto reproductor. Tras ella, ponen los huevos y se desarrollan externamente, en el mar. Los genes que hemos estudiado participan en la serie elaborada y totalmente estereotipada de comportamientos coordinados que culminan en el proceso de la puesta de huevos.

Los huevos se depositan en largas ristras de más de un millón de unidades. Cuando el caracol expulsa una ristra de huevos por contracción de los músculos del tracto reproductor se queda inmóvil, deja de comer y aumentan sus rit-

mos cardiaco y respiratorio. El caracol sujeta la ristra de huevos con la boca y con una serie de oscilaciones características de la cabeza ayuda a expulsar la ristra del tracto y la apelotona en forma de una bola irregular. Por una pequeña glándula de su boca secreta un mucus pegajoso que se fija a la bola. Con una oscilación brusca de la cabeza fija luego la masa apelotonada de los huevos a un soporte sólido (por ejemplo, una roca). Diferentes acciones se han integrado aquí en una secuencia rígidamente coordinada y dirigida a una función común: la puesta de huevos fecundados en condiciones que les proporcionen protección durante su desarrollo.

¿Qué sustancias controlan ese patrón coordinado de comportamiento y qué genes codifican esas sustancias? En primer lugar, ¿dónde se sintetizan las sustancias? Hace algunos años, Kandel e Irving Kupfermann identificaron dos agrupaciones de neuronas, las células sacciformes, en el extremo del ganglio abdominal. La inyección de un extracto de esas células en caracoles provocó el repertorio completo de comportamientos asociados con la puesta, incluso en ausencia de apareamiento o de fecundación de los huevos. En estudios posteriores, Stephen W. Arch, del Reed College, y Felix Strumwasser, del Instituto de Tecnología de California, aislaron uno de los factores activos de las células sacciformes, identificándolo como un péptido, una pequeña proteína, de 36 aminoácidos. Encontraron que al administrar el péptido a los caracoles se evocaban algunos comportamientos asociados con la puesta de huevos, pero no todos, lo que revelaba que el péptido era sólo uno de los factores de control del comportamiento global. Strumwasser determinó la secuencia primaria de los aminoácidos del péptido, designado ya hormona de la puesta de huevos, o ELH (por *egg-laying hormone*). Al existir una relación lineal entre la secuencia de aminoácidos de una proteína y la de los nucleótidos



1. PUESTA DE HUEVOS de *Aplysia*, un caracol marino de gran tamaño, en un acuario de laboratorio. Comienza el proceso cuando el animal contrae los músculos del tracto reproductor para expulsar una ristra de huevos (*1*). Sujeta la ristra con la boca (*2*) y mueve la cabeza en vaivén (*3*) para favorecer la salida de la ristra del tracto reproductor. Finalmente, el caracol fija la ristra apelotonada en un sustrato sólido (*4*). En el ejemplo que aquí se ilustra se indujo el comportamiento en un caracol no apareado inyectándole un extracto de células sacciformes de *Aplysia*: neuronas que sintetizan una "poliproteína" a partir de la cual se escinden una hormona de la puesta de huevos (ELH) y otros péptidos asociados con el comportamiento de la puesta de huevos.

del gen que la codifica, la identificación y secuenciación de un péptido controlador del comportamiento sitúa un problema de biología del comportamiento en el ámbito de la genética molecular.

En colaboración con Linda B. McAllister, James F. Jackson, James H. Schwartz y Kandel procedimos a aislar el gen que codificaba la ELH a partir del genoma de *Aplysia*: la dotación completa de ADN de los cromosomas del caracol. El método de aislamiento de genes específicos se vale de las técnicas de ADN recombinante. En síntesis, se reúne una pequeña "biblioteca" de moléculas de ADN recombinante, cada una de ellas con un pequeño fragmento del genoma de *Aplysia*; a continuación, se escruta la biblioteca con una sonda que detecte el gen de la ELH. Escindimos el ADN del caracol en varios millares de fragmentos, cada uno de ellos, según nuestros cálculos, con uno o varios genes. "Recombinamos" los frag-



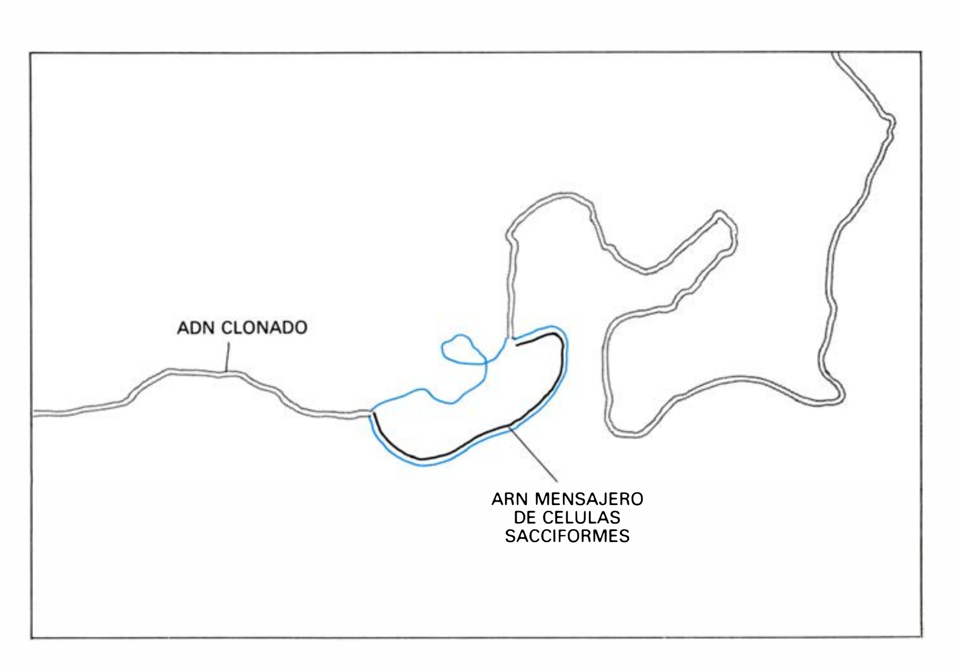
2. GANGLIO ABDOMINAL de *Aplysia* aumentado unos 40 diámetros en esta micrografía de los autores. En los extremos superiores, izquierdo y derecho, se aprecian dos agrupaciones de células sacciformes, donde se sintetiza la ELH, a través de los grandes haces nerviosos. En el interior del cuerpo principal del ganglio se distinguen varias neuronas de gran tamaño, muchas de las cuales se han identificado una por una, comprobándose que son idénticas en todos los miembros de la especie. Se ha demostrado que la ELH y sus péptidos asociados ejercen efectos específicos en la descarga de ciertas neuronas.

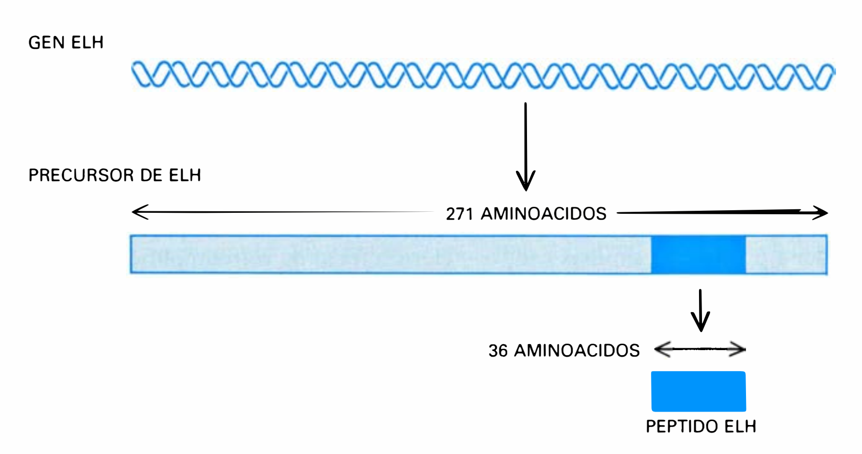
mentos del ADN de *Aplysia* con el ADN de un virus bacteriano, el fago lambda, y empaquetamos el ADN recombinante en el interior de la cubierta proteica del fago. Los fagos híbridos sirvieron de vectores para introducir los pequeños fragmentos de ADN en las bacterias y obtener clones de los mismos. Cuando se añaden fagos a un cultivo de bacterias, cada fago infecta una sola célula bacteriana, se multiplica en ella y provoca su muerte; la progenie de fagos sigue multiplicándose y destruye las células adyacentes, formando una placa, o hueco, en el cultivo. Cada placa la ocupan millones de fagos procedentes de un único ejemplar, por lo que contiene un clon de millones de copias de un mismo fragmento de ADN, en nuestro caso de *Aplysia*.

La selección de la sonda utilizada para escrutar los clones y encontrar el gen de la ELH se basa en la copiosa síntesis de esta hormona en las células sacciformes, que deben contener, en consecuencia, ARN mensajero de la ELH en grandes cantidades. Quizá convenga aquí una explicación. El ADN es una molécula bifilar, de dos cadenas, construidas con cuatro tipos de nucleótidos diferentes. La información genética está codificada en la secuencia de nucleótidos que define un gen. Cada grupo de tres nucleótidos forma un codón, o término de codificación; cada codón especifica, a su vez, un aminoácido de los 20 que constituyen las proteínas. El ADN, sin embargo, no se traduce en proteínas directamente. La hebra del ADN que contiene el mensaje cifrado se transcribe primero a una hebra complementaria de un ácido nucleico similar, el ARN mensajero (cuya secuencia de nucleótidos es reflejo de la secuencia del gen); el ARN se traduce luego a proteína de acuerdo con el código genético.

Puesto que el ARN mensajero de la ELH predomina en las células sacciformes pero no en los tejidos no nerviosos, aislamos el ARN mensajero de células sacciformes y de células no nerviosas. Efectuamos la "transcripción inversa" de ese ARN en su ADN complementario y marcamos el ADN con un isótopo radiactivo. Expusimos entonces el ADN marcado a la biblioteca de clones recombinantes, en condiciones en las que el ADN complementario podía "hibridar", o unirse a trozos de genes clonados que codificaban la ELH; el ADN complementario de células no nerviosas no debía hibridar. Se revelaron por autorradiografía los clones que hibridaban con el ADN radiac-







3. MICROGRAFIA DEL GEN ELH (*arriba*). Se recombinaron fragmentos del ADN del caracol con el ADN de un virus bacteriano y se clonaron. Se identificó un clon que contenía el gen ELH, se extendió y se dejó interactuar con ARN mensajero en condiciones favorables a la formación de híbridos ARN-ADN. Como se muestra en la parte intermedia, el ARN (*negro*) hibridó con la hebra complementaria del gen ELH (*color*), rompiendo el ADN de doble cadena clonado. Cuando se descifró la secuencia del gen ELH, se comprobó que codificaba una cadena de 271 residuos de aminoácidos de una proteína precursora. En el interior de la proteína precursora se identificó el péptido ELH, de 36 aminoácidos de extensión.

tivo y no hibridaban con el ADN de células distintas de las neuronas.

Identificamos así algunos clones que contenían los genes ELH. (Como veremos, existían tres clases de genes algo diferentes, pero no hasta el punto de impedir que la sonda de las células sacciformes hibridara con todos ellos.) Tras identificar los clones que contenían el gen ELH cultivamos algunos de ellos a gran escala, aislamos sus ADN recombinantes y los sometimos a la acción de ARN mensajeros de ELH. Las micrografías electrónicas nos permitieron detectar los sitios exactos de la larga molécula de ADN recombinante donde el ARN hibridaba con el ADN complementario y, con ello, determinar el trozo preciso de ADN que constituía el gen ELH.

Una vez aislado el gen ELH, procedimos a su secuenciación: investigamos el orden en que se disponían sus nucleótidos. Conocida la secuencia de los nucleótidos procedimos a "retrotraducirla" según el código genético, para deducir la secuencia de aminoácidos de la cadena de proteína codificada por el gen. La proteína producto del gen debía tener 271 restos de aminoácidos. Sabíamos, sin embargo, que la hormona ELH constaba de sólo 36 aminoácidos; hallamos, en efecto, la breve secuencia de la ELH dentro de la secuencia más larga de la proteína completa. El péptido ELH estaba flanqueado a derecha e izquierda por el mismo par de aminoácidos: lisina y arginina. Se sabe que el par lisina-arginina actúa de señal de rotura. Indica por qué punto ciertas enzimas específicas cortan una gran cadena de proteína precursora para producir una proteína o péptido activo menor. La explicación más obvia, por tanto, era que la cadena de 271 aminoácidos constituía una molécula precursora a partir de la cual se desgajaba la ELH.

Resultaba sorprendente, sin embargo, que el péptido ELH fuera una parte tan pequeña de la proteína producto del gen ELH. ¿Se desprendía el resto de la cadena precursora sin más uso, o contenía péptidos con actividad biológica? Buscamos en la secuencia otras posibles señales de rotura. Aparecieron un total de 10 de esas señales; si se reconociera y cortara cada uno de los sitios, se obtendrían 11 péptidos diferentes a partir de la proteína precursora de ELH. Ello suscitaba la posibilidad apasionante de que los péptidos fueran también elementos de control del comportamiento de la puesta de huevos.

Earl M. Mayeri y colaboradores, de la Facultad de Medicina de la Universidad de California en San Francisco, habían investigado las propiedades fisiológicas de los neuropéptidos liberados por las células sacciformes. Unimos nuestros esfuerzos para averiguar si alguno de los péptidos predichos a partir de la secuencia del gen ELH se encontraba en los extractos de las células sacciformes y, en caso afirmativo, si se detectaba su actividad en el sistema nervioso. Mayeri y Barry S. Rothman identificaron y establecieron la secuencia de otros tres pequeños péptidos en las agrupaciones de células sacciformes: el factor alfa de las células sacciformes, el factor beta de esas mismas células y el péptido acídico. Comprobamos que todos esos péptidos, unidos por sitios de rotura, estaban codificados, junto con la ELH, en el gen que habíamos aislado. Experimentos electrofisiológicos demostraron que tres de los cuatro péptidos (ELH y los factores alfa y beta) interactuaban con neuronas específicas e identificables del ganglio abdominal, donde cumplían una función neurotransmisora: mediaban en la transferencia de actividad eléctrica entre dos neuronas.

La ELH actuaba localmente como transmisor-excitador, aumentando la descarga de la neurona del ganglio abdominal denominada *R*15. Además, el péptido ELH se difundía por el sistema circulatorio y excitaba las células musculares lisas del tracto reproductor, incitando su contracción y la expulsión de la ristra de huevos. En otras palabras, la ELH no sólo ejercía una función neurotransmisora, sino que actuaba también como hormona. (El efecto del péptido sobre el músculo del tracto se observó antes que su actividad sobre el sistema nervioso; de ahí su nombre de hormona de la puesta de huevos.) El factor beta era también un transmisor-excitador. Producía la descarga de dos neuronas simétricas, *L*1 y *R*1, cuyas funciones se desconocen. El tercer neuropéptido, el factor alfa, era un transmisor-inhibidor. Inhibía la descarga de un grupo de cuatro neuronas, *L*2, *L*3, *L*4 y *L*6. Además, parecía ejercer cierto efecto de retroamplificación: excitaba las células sacciformes de las que se había liberado.

La asociación de estos tres péptidos, codificados por un único gen, con la actividad de conjuntos diferentes de neuronas (y células musculares) sugería un posible y curioso mecanismo de generación de la serie, impresionantemente compleja, de comportamientos ligados a la puesta. Un único gen, al parecer, especificaba una "poliproteína": cadena proteica que se escinde en varios péptidos pequeños dotados de actividad biológica. Quizá todos los componentes del comportamiento de la puesta de huevos estuvieran relacionados mediante péptidos codificados por ese único gen. En cuyo caso, se daría un efecto del todo o nada: ningún componente del comportamiento podría actuar en ausencia de los otros. Además, la síntesis de una única poliproteína coordinaría inflexiblemente la cronoregulación de un conjunto de comportamientos relacionados. Un único gen que codificara múltiples péptidos neuroactivos podría así dictar una serie complejísima de comportamientos innatos: una pauta de comportamiento.

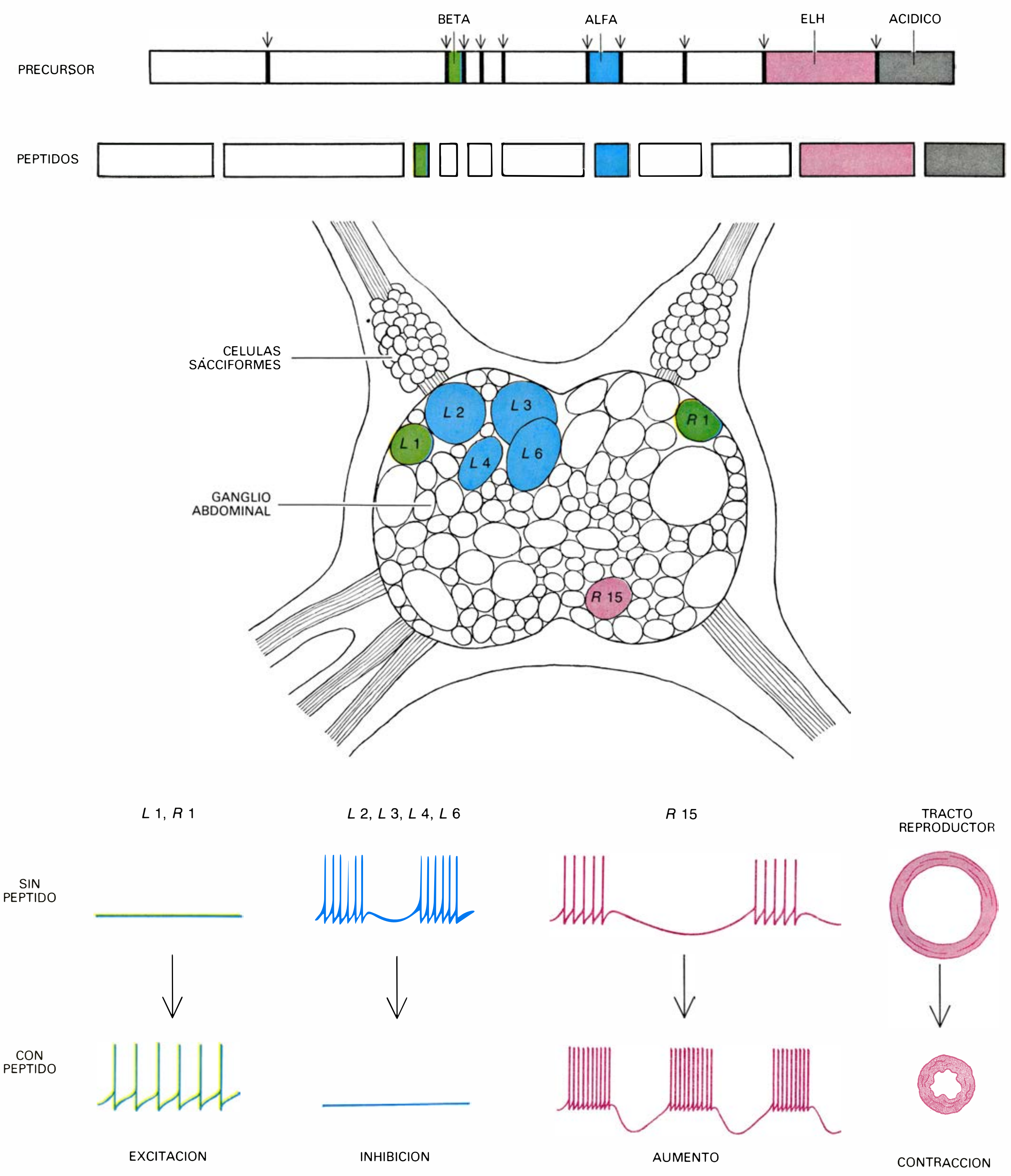
Si, efectivamente, péptidos procedentes de una única poliproteína median en los comportamientos de la puesta de huevos, ¿qué controla la liberación de los péptidos para iniciar la compleja serie de comportamientos en el momento adecuado de la vida del animal? La ELH y los otros péptidos que, presumiblemente, participan en el proceso de la puesta de huevos se liberan después de una prolongada excitación eléctrica de las células sacciformes. El grupo de Strumwasser ha aislado y descifrado la secuencia de los dos péptidos, llamados *A* y *B*, que se sintetizan en la glándula atrial, un órgano del sistema reproductor del caracol. Al inyectar al animal los péptidos de la glándula atrial, se excitan las agrupaciones de las células sacciformes, induciéndose la liberación de la ELH y de sus péptidos asociados de las células sacciformes. No se ha demostrado todavía si los péptidos *A* y *B* desencadenan el proceso de la puesta de huevos, aunque, en el laboratorio, parecen controlar la liberación de los péptidos de las células sacciformes.

Al examinar la secuencia de aminoácidos de los péptidos *A* y *B*, observamos una homología (identidad o casi identidad) entre los bloques de aminoácidos de la proteína precursora de ELH y fragmentos de péptidos de la glándula atrial. Recuérdese que en nuestros experimentos de clonación la sonda radiactiva obtenida a partir del ARN mensajero de la ELH hibridaba con tres ADN algo diferentes, de los que sólo uno de ellos codificaba la ELH y sus péptidos asociados de las células sacciformes. Existía la posibilidad de que los tres ADN fueran miembros de una familia multigénica, y que uno de ellos codificara la ELH y, los otros dos, los péptidos *A* y *B*.

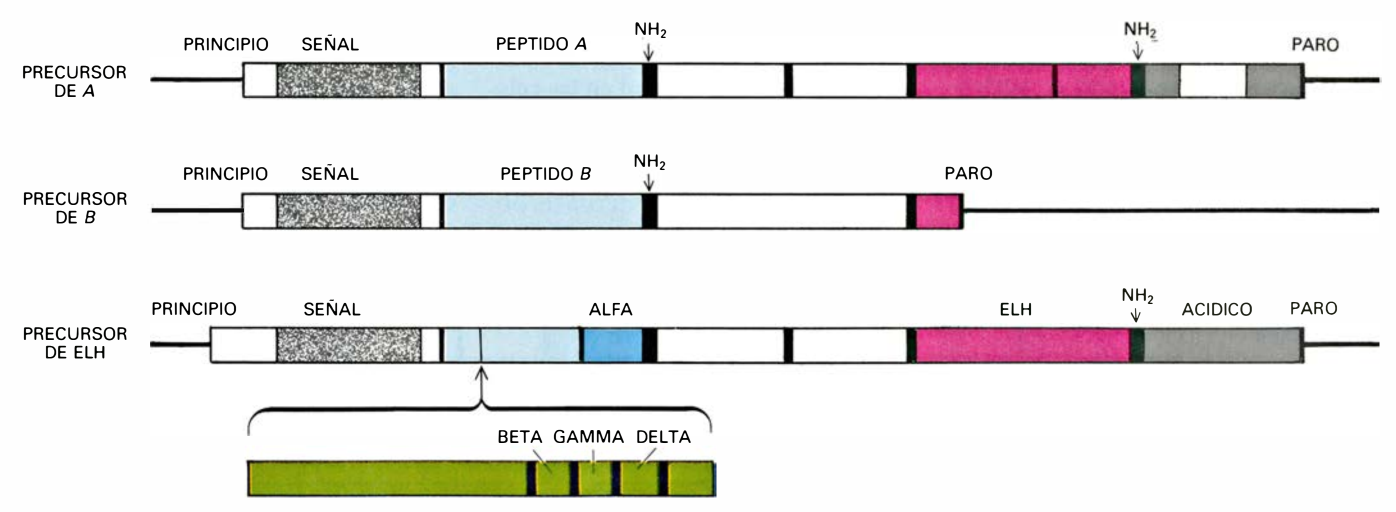
En una serie de experimentos de hibridación demostramos que el ARN mensajero derivado de los genes relacionados con el gen ELH se sintetizaba

en la glándula atrial, donde Strumwasser había encontrado los dos péptidos. Determinamos la secuencia de nucleótidos de los dos genes y, por traducción inversa, la secuencia de aminoácidos codificada por cada uno de ellos. Vimos inmediatamente que, aunque los dos genes estaban estrechamente relacionados con el ELH, no codificaban el péptido ELH activo en las células sacciformes, sino los péptidos *A* y *B* de la glándula atrial. Los tres genes eran, ciertamente, miembros de una pequeña familia multigénica con un origen evolutivo común, que se separaron generando conjuntos de péptidos diferentes, aunque con relación funcional.

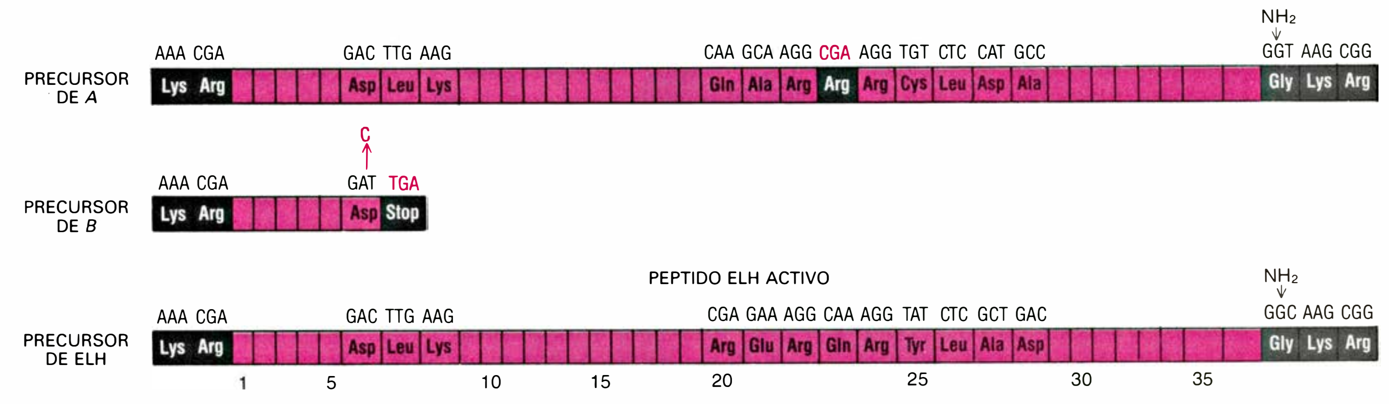
Las semejanzas y diferencias aparecen al comparar en detalle las tres secuencias de nucleótidos y aminoáci-



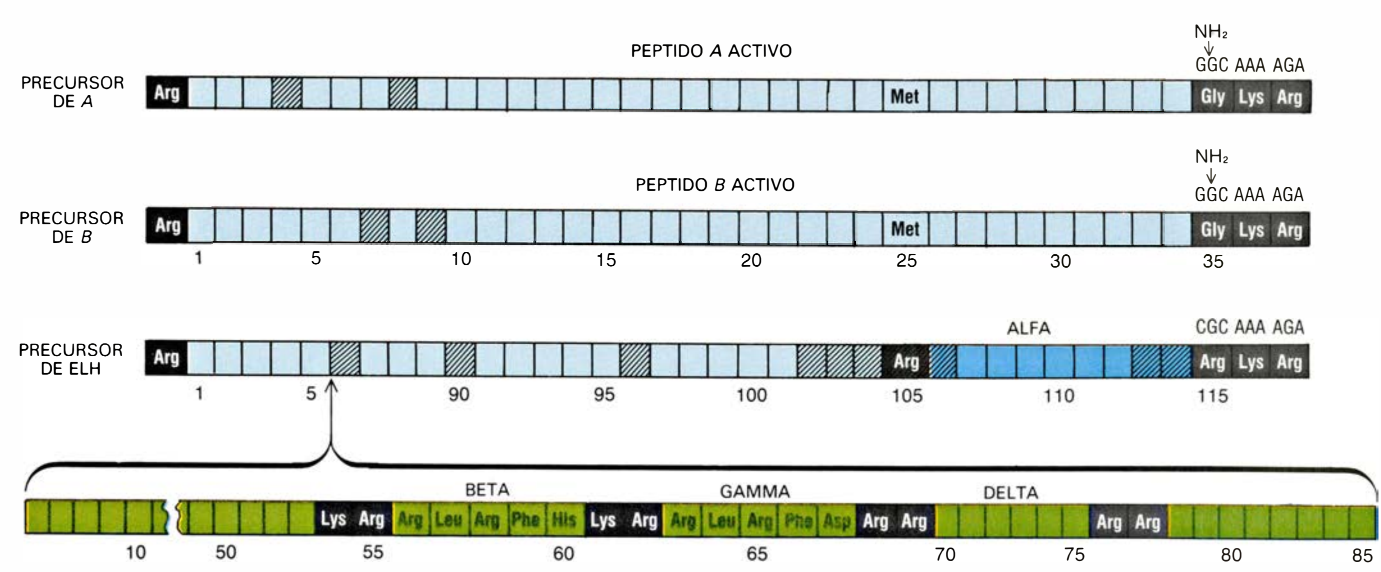
4. EL PRECURSOR DE LA ELH ha resultado ser una poliproteína que contiene varios péptidos activos. El precursor (*arriba*) contiene 10 sitios (*flechas*) por donde la cadena de proteína se rompe por acción de unas enzimas llamadas endopeptidasas. Si la proteína se rompiera por todos los sitios se liberarían 11 péptidos (*segunda fila, arriba*). Se sabe que las células sacciformes liberan cuatro de ellos: los factores beta y alfa de las células sacciformes, la ELH y el péptido acídico. Tres de ellos (*péptidos de color*) actúan como neurotransmisores, alterando la actividad de neuronas específicas del ganglio abdominal (*células de color*), de una forma específica (*abajo*). El factor beta excita las células *L*1 y *R*1; alfa inhibe las células *L*2, *L*3, *L*4 y *L*6; ELH aumenta la descarga de la neurona *R*15. También penetra en la circulación y actúa como una hormona, induciendo la contracción del tracto reproductor.



5. TRES PROTEINAS PRECURSORAS codificadas por los tres miembros de la familia multigénica de la ELH. Todas ellas son susceptibles del ataque por parte de enzimas que las rompen por sitios específicos (*barras negras*) originando péptidos activos, algunos de los cuales sufren posteriormente amidación (*NH_2*). Los tres precursores comparten una secuencia señal (*izquierda*) y varias regiones homólogas, o muy similares, que originan, en uno u otro precursor, el péptido *A* o el péptido *B*, o la ELH y el péptido acídico. Diferencias en un único nucleótido alteran los genes *A* y *B*, de forma que no se sintetiza la ELH activa. Una inserción de 80 aminoácidos en el gen ELH interrumpe las secuencias de los péptidos *A* y *B* y da lugar a otros péptidos diferentes.



6. LA REGION DE HOMOLOGIA DE LA ELH es muy semejante en los tres genes, es decir, la secuencia en que se disponen los cuatro nucleótidos (*A*, *G*, *C* y *T*) es prácticamente idéntica, de forma que los codones trinucleotídicos especifican los mismos aminoácidos en la mayoría de las posiciones (aquí se muestran sólo algunos de los codones y aminoácidos más importantes). El gen ELH origina un péptido ELH activo, a diferencia de los otros dos genes. En el gen del precursor de *A* la sustitución de un nucleótido *G* por una adenina en la posición 23 determina la presencia de una arginina en vez de una glutamina, originando una secuencia de tres argininas y, consecuentemente, un posible sitio de rotura. En el gen del precursor de *B*, el sexto codón pierde por deleción un nucleótido *C*, alterando la "fase de lectura", de forma que se introduce un *TGA* en la posición 7. *TGA* determina el fin de la traducción.



7. UNA INSERCION DE 80 AMINOACIDOS en el gen ELH interrumpe la región de homología de los péptidos *A* y *B*, que se rompe por los sitios lisina-arginina dando tres péptidos: los factores alfa, gamma y delta de las células saciformes. (Obsérvese la casi identidad de los factores beta y gamma, que se han originado, presumiblemente, por duplicación de una breve secuencia de ADN.) La sustitución en la posición 105 de la región de homología de una metionina de los precursores de *A* y *B* por arginina en el precursor de la ELH crea un sitio de rotura, rindiendo otro péptido activo, el factor alfa. Salvo desde la inserción, los tres precursores son muy similares. Los cuadros sombreados indican los sitios con aminoácidos diferentes en los distintos péptidos.

dos [*véanse las figuras 5, 6 y 7*]. Cada gen codifica una proteína precursora en la que ciertos sitios ocupados por pares lisina-arginina (o en algunos casos una sola arginina o dos argininas adyacentes) delimitan los bloques de aminoácidos que se escinden para dar lugar a péptidos activos. Los tres péptidos precursores poseen al principio una secuencia señal característica, de unos 25 aminoácidos, que gobierna la elaboración de la cadena de proteína. La cadena recién traducida penetra en la luz de un sistema de membranas llamado retículo endoplásmico rugoso, donde comienza a modificarse: la secuencia señal se separa y se incorporan moléculas de azúcar y fosfato a la proteína, que migra al aparato de Golgi. En él, el precursor proteico se escinde en sus péptidos componentes, que quedan encerrados en pequeñas vesículas o bolsas. En respuesta a estímulos adecuados, las vesículas se fusionan con la membrana externa de la célula secretora y liberan su contenido, que va a interactuar con las células nerviosas, se difunde a través del ganglio o entra en la circulación.

Las diferencias entre los precursores que contienen los péptidos *A* y *B* y el precursor que contiene la ELH comienzan detrás de la secuencia señal. Examinamos primero los precursores de *A* y *B*. Un sitio con una sola arginina indica el principio de los péptidos *A* y *B*, que constan de 34 aminoácidos cada uno. Al final de esos péptidos aparece una secuencia glicina-lisina-arginina, que actúa como señal de rotura y también de transamidación: adición de un grupo amino ($-NH_2$) al final del péptido, reemplazando al grupo hidroxilo ($-OH$) usual. La transamidación "bloquea" el extremo del péptido, quizás aumentando su resistencia a la degradación. Sigue, en los dos péptidos precursores de *A* y *B*, un fragmento de 47 aminoácidos sin relación con ningún péptido conocido. Después viene otro sitio de rotura de lisina-arginina, y, a continuación, lo que parece el comienzo del péptido ELH.

La ELH no se sintetiza, sin embargo, en la glándula atrial. El examen de la secuencia de nucleótidos de los genes de la glándula atrial nos revela la razón. En el caso del gen del péptido *A*, los primeros 22 aminoácidos de la ELH están codificados correctamente. Luego, la diferencia de un solo nucleótido en el codón del aminoácido en posición 23 genera una secuencia arginina-arginina-arginina, produciendo un posible sitio de rotura e interrumpiendo lo que, de otra manera, hubiera sido el péptido ELH. En el gen del péptido *B* se observa una clase diferente de cambio en un solo nucleótido. En este caso, un nucleótido del codón que está en sexta posición sufre una deleción. El "esquema de lectura" de los tripletes de nucleótidos cambia de manera que se genera un codón de terminación: la traducción se para después de la síntesis de un pequeño trozo de ELH de seis aminoácidos.

Consideremos el péptido precursor de la ELH que se sintetiza en las células sacciformes. La secuencia de nucleótidos del gen correspondiente es muy similar a la del gen que codifica los péptidos *A* y *B*, aunque no especifica estos péptidos: determina ELH y otros péptidos que participan en el comportamiento de la puesta de huevos. Comienza con la misma secuencia señal que aparece en los precursores de *A* y *B*. Siguen luego los 5 primeros aminoácidos del péptido *B*. Al llegar a este punto, sin embargo, el precursor de la ELH diverge totalmente de los precursores de *A* y *B*. El gen ELH contiene una secuencia de 240 nucleótidos que no aparecen ni en el gen *A* ni en el *B*; codifica 80 aminoácidos. La inserción incluye cuatro señales de rotura que delimitan tres factores de las células sacciformes: beta, gamma y delta. Se sabe que el factor beta, como hemos mencionado, tiene un efecto específico sobre las neuronas *L*1 y *R*1 del glanglio abdominal.

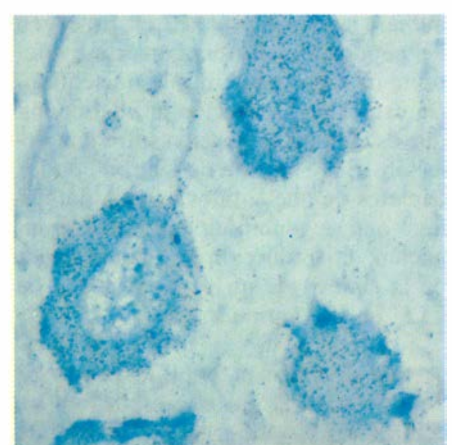
Después de la inserción, la secuencia de nucleótidos continúa, sin ninguna alteración del esquema de lectura, codificando el sexto aminoácido del péptido *B*, y procede luego con una secuencia muy semejante a la de los dos genes de la glándula atrial. En esta región hallamos una divergencia particularmente significativa. Se introduce un sitio de rotura, generándose el nonapéptido correspondiente al factor alfa de las células sacciformes, factor que, como queda dicho, inhibe la descarga de cuatro neuronas del ganglio abdominal.

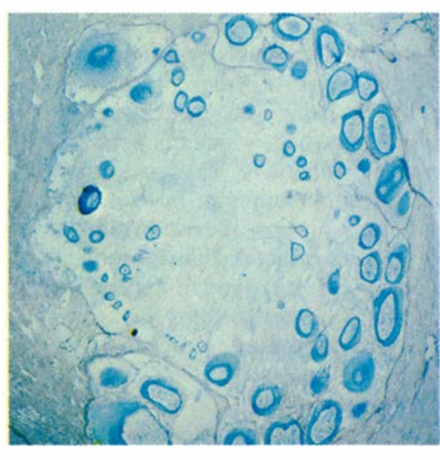
Viene a continuación un fragmento de homología incompleta con los genes *A* y *B*; tras ese fragmento un sitio de rotura indica el comienzo de los 36 aminoácidos del péptido ELH. El final del péptido, como ocurría en *A* y *B*, va seguido de una señal de rotura y transamidación. Entre el final del péptido ELH y el codón de paro que detiene la traducción contamos 27 aminoácidos: los aminoácidos del péptido acídico que se libera de las células sacciformes junto con ELH y cuyo blanco de acción se desconoce.

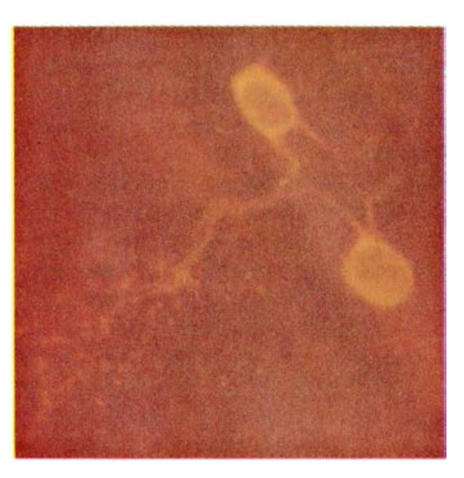
Tenemos, pues, tres genes con tres regiones homólogas en común: la región *A* o *B*, la región ELH y la región péptido-acídica. Además, en el interior de cada región peptídica existen secuencias casi idénticas en posiciones fijas. De lo cual se infiere que los tres péptidos proceden originalmente de un pequeño péptido ancestral cuyo gen se triplicó, generando una proteína de mayor tamaño, compuesta por tres péptidos, al menos. Al parecer, el gen que determina esa proteína de mayor tamaño se triplicó a su vez, dando lugar a tres genes independientes que se diferenciaron al especializarse para satisfacer distintas exigencias funcionales. Luego pudieron darse duplicaciones menores de algunas regiones pertenecientes a uno u otro gen, como lo sugiere el hecho de que los péptidos adyacentes beta y gamma sean prácticamente idénticos. Tal proceso permitió, presumiblemente, la evolución de variantes sin una alteración significativa del gen original. Las diferentes versiones del gen pueden haberse traspuesto a distintos sitios del genoma, quizás a diferentes cromosomas.

Al disponer de clones de genes de ELH y contando con la colaboración de McAllister y Kandel, estábamos en condiciones de plantearnos si los genes se expresaban (se transcribían a ARN mensajeros que luego se traducían a proteínas) no sólo en las células sacciformes y en la glándula atrial de los caracoles adultos, sino también en otras partes del sistema nervioso de *Aplysia*; y rastrear el desarrollo de las neuronas donde se expresaba el gen. Para ello utilizamos dos técnicas: hibridación local e inmunocitoquímica. La primera se apoya en el dato siguiente: dondequiera se exprese un gen, allí encontraremos el ARN mensajero transcrito a partir del mismo. Cortamos una sección fina de tejido, montamos el corte en un portaobjetos de microscopio y lo tratamos para hacer accesible el ARN celular a la hibridación molecular. Cuando se aplican al porta los genes ELH marcados con un isótopo radiactivo, hibridan con el ARN mensajero complementario: su localización se revela por autorradiografía. Las técnicas inmunocitoquímicas, por otra parte, ponen de manifiesto la presencia del péptido. Se aplica al porta un anticuerpo contra el péptido ELH, que se unirá al péptido si éste se encuentra presente. Luego se añade un segundo anticuerpo, seleccionado para que se una al primero y que lleva enlazado un colorante fluorescente. La inspección del sistema con luz ultravioleta revela la localización celular del péptido.









8. SITIOS DE SINTESIS DE LA ELH, que se revelan por hibridación local con el ARN mensajero del péptido (*arriba izquierda y derecha, abajo izquierda*) y unión de anticuerpos al péptido (*abajo, derecha*). Se deja interactuar una sección del ganglio abdominal con una sonda del gen ELH marcado con un isótopo radiactivo (*arriba, izquierda*). La sonda hibrida con el ARN mensajero de la ELH, y se localiza por autorradiografía. Los puntos negros indican la hibridación en las células sacciformes (agrupaciones redondeadas en el margen superior del ganglio) y también en una neurona ubicada hacia la mitad del ganglio. El aumento es de unos 17 diámetros. Un aumento de unos 400 diámetros permite observar el ARN mensajero de la ELH en el citoplasma de las células sacciformes y sus prolongaciones (*arriba, derecha*). Se detecta también el ARN mensajero de la ELH en una célula aislada de otro grupo de neuronas, el ganglio pleural (*abajo, izquierda*). En un experimento con inmunofluorescencia (*abajo, derecha*), se aplica un anticuerpo contra la ELH a una sección del ganglio abdominal. Se aplica un segundo anticuerpo contra el anti-ELH, enlazado a un colorante. La fluorescencia naranja brillante destaca la presencia de la ELH en dos células del ganglio abdominal y en sus prolongaciones. (Micrografía de los autores.)

Hemos realizado estudios de hibridación e inmunofluorescencia de todo el sistema nervioso central del caracol. Las dos técnicas mencionadas detectan neuronas individuales que expresan un gen ELH, incluso en ganglios compuestos por varios miles de células que no lo expresan. Las células sacciformes y la glándula atrial son, sin duda, los sitios principales de expresión de los genes ELH, aunque los experimentos indican que el ARN mensajero de ELH y el péptido ELH se sintetizan también en una amplia red de células nerviosas, no sólo en el ganglio abdominal, sino también en otros tres ganglios. Asimismo, mediante experimentos similares, Strumwasser y Arlene Y. Chiu han identificado neuronas que sintetizan ELH fuera de las agrupaciones de las células sacciformes. Al parecer, la ELH puede cumplir una amplia función neurotransmisora en todo el sistema nervioso de *Aplysia*.

La presencia en cuatro ganglios de células dispersas productoras de ELH suscita la pregunta de cómo se formaron esas células en el curso del desarrollo. Recurriendo a experimentos de hibridación local en animales en desarrollo descubrimos en qué momento los genes de ELH se expresan por primera vez y el sitio donde se originan las neuronas que expresan los genes ELH. En todos los animales, el sistema nervioso se desarrolla como una especialización del ectodermo, la superficie del cuerpo embrionario. Los genes ELH se presentan activos desde los estados larvarios precoces del desarrollo del caracol, en una zona de células primigenias que recubren la pared del cuerpo embrionario, que se convertirán en neuronas. En un estadio posterior del desarrollo estas células abandonan la pared y emigran, arrastrándose por las fibras de tejido conjuntivo, hasta su emplazamiento definitivo en el sistema nervioso del adulto. Quizás una sola neurona primitiva se divida para formar una agregación de células productoras de ELH, que emigran hasta las células sacciformes y hacia puntos dispersos del sistema nervioso.

En *Aplysia*, tres genes, al menos, codifican ciertos péptidos neuroactivos implicados en los circuitos que gobiernan un repertorio de comportamientos complejos y estereotipados. En el cerebro de mamíferos se han identificado también ciertos péptidos, que median, según parece, en comportamientos específicos [véase "Neuropéptidos", por Floyd E. Bloom; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 1981]. ¿Qué propiedades de los neuropéptidos, y, en particular, qué características de su modo de síntesis, los capacitan para una función de mediación en la conducta?

El potencial conductual de un organismo viene dictado, al menos parcialmente, por una rígida red de interneuronas. Gran parte de la comunicación entre las neuronas es local y está mediada por neurotransmisores del tipo de la acetilcolina o la noradrenalina, que se liberan de una neurona, atraviesan el estrecho espacio sináptico y establecen contacto, punto por punto, con otra neurona. Los péptidos neuroactivos desempeñan también funciones neurotransmisoras locales; pueden, además, verterse a la circulación para que actúen como neurohormonas sobre varias células diana distantes e induzcan distintas actividades. Los péptidos configuran, de ese modo, otra red de comunicación, complementaria de la compacta red de conexiones que forman las células nerviosas interconectadas.

La diversidad de sitios donde actúa un neuropéptido le capacita para coordinar actividades fisiológicas con comportamientos particulares. Por ejemplo, al inyectar el péptido angiotensina II en los vertebrados se provoca espontáneamente el acto de beber, por acción del neuropéptido sobre las neuronas cerebrales del hipotálamo. El péptido también actúa indirectamente en el riñón promoviendo la reabsorción de sodio y agua al torrente circulatorio, en vez de su excreción. Esos dos efectos, tan diferentes, sirven para rehidratar al animal. La ELH proporciona un ejemplo comparable. En *Aplysia*, la ELH actúa localmente en los ganglios

excitando neuronas específicas que pueden inducir conductas, como la de mover la cabeza, y cambios fisiológicos, verbigracia acelerar el ritmo cardiaco. Simultáneamente, actúa a distancia, provocando la contracción del tracto reproductor y la expulsión de huevos.

Ciertos péptidos de *Aplysia* relacionados con la puesta de huevos se escinden a partir de una única poliproteína precursora. Se sabe que otros neuropéptidos conocen un proceso de síntesis similar. La ruta que parte de una poliproteína parece ofrecer varias ventajas. Por una parte, constituye un mecanismo simple para el control de la síntesis y liberación del péptido. Péptidos diferentes, codificados por un solo gen, pueden sintetizarse simultáneamente bajo el control de un único agente regulador. Además, los diversos péptidos pequeños de una poliproteína pueden, después de desgajarse del precursor, empaquetarse en la misma vesícula y liberarse a la vez de la célula en la que se han sintetizado por acción de un único estímulo.

La generación de múltiples péptidos a partir de un solo precursor resuelve también un problema numérico: la cantidad de genes de un genoma animal no basta para especificar el abanico de comportamientos propios de una especie. La información potencial de un gen puede aumentarse si la proteína producto del gen se escinde diversamente en células distintas o en respuesta a estímulos diferentes. Un ejemplo de elaboración alternativa de una proteína ha sido observado por Edward Herbert, de la Universidad de Oregon, y James L. Roberts, de la Facultad de Medicina y Cirugía de la Universidad de Columbia, así como por Richard E. Mains y Betty A. Eipper, de la Facultad de Medicina de la Universidad Johns Hopkins. Descubrieron que un único precursor se procesa, en el lóbulo anterior de la hipófisis, dando lugar a la hormona corticótropa (ACTH) y, en el lóbulo posterior, rindiendo un péptido endorfinoide. Por nuestra parte, hemos observado un patrón de rotura del precursor de la ELH en una sola célula. En principio, dados los sitios de rotura que hemos encontrado, la proteína podría escindirse de distintas maneras produciendo más de 2000 combinaciones diferentes de péptidos, cada combinación con capacidad para activar un patrón distinto de conducta.

La ruta de la poliproteína ofrece una flexibilidad temporal, al permitir que los péptidos permanezcan activos más o menos tiempo. La estabilidad de un péptido puede verse afectada por ciertas modificaciones después de su síntesis, verbigracia, por transamidación, o incluso por el tamaño (ya que los pequeños no se pueden plegar fácilmente en estructuras compactas y, por ende, su probabilidad de degradarse es mayor que la de los péptidos de gran tamaño). Tanto el patrón de amidación como el tamaño de los diversos péptidos de la puesta de huevos son coherentes con las funciones para las que se les requiere. Los péptidos (ELH, *A* y *B*) que pueden actuar como hormonas sufren amidación y son más largos, con lo que probablemente se prolongue su vida activa. Los péptidos que, al parecer, actúan solamente como neurotransmisores locales (por ejemplo, los factores alfa y beta de las células sacciformes), son más cortos y no tienen grupos amídicos. Es probable que tarden menos en degradarse, como la mayoría de los neurotransmisores.

La organización de los genes que determinan poliproteínas ofrece un grado impresionante de flexibilidad evolutiva. La mezcla de secuencias que codifican un conjunto de péptidos activos en un gen que también codifica proteínas no funcionales permite la evolución de péptidos activos nuevos sin necesidad de alterar el conjunto original. El gen ELH, por ejemplo, tiene una inserción de 240 nucleótidos, que no se halla en los genes homólogos que se expresan en la glándula atrial. La inserción codifica tres péptidos (dos de los cuales parecen reflejar una pequeña duplicación interna), expandiendo, en consecuencia, la serie de péptidos coordinados de la poliproteína, sin afectar a la síntesis de ELH activa.

Finalmente, el mismo péptido puede incorporarse a varios precursores diferentes codificados por genes distintos. Consideremos el movimiento de cabeza de *Aplysia*. El vaivén característico de la cabeza del caracol ocurre durante la toma de alimentos y durante la puesta de huevos. Un mismo péptido (o péptidos) podría evocar el mismo componente del comportamiento (vaivén de cabeza) en dos contextos muy diferentes. Con este fin, el péptido (o péptidos) de la oscilación de cabeza podría estar codificado en otro gen (el que participa en el comportamiento de la toma de alimentos) y en el gen ELH. De esta forma, los comportamientos complejos podrían ensamblarse mediante la combinación de unidades simples de conducta, y depender, cada una de las unidades, de la acción de un péptido o un pequeño grupo de éstos.

Ciencia y sociedad

Vocabulario científico y técnico

Editado por la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, acaba de salir el *Vocabulario científico y técnico*, una suerte de hermano menor del *Diccionario de la lengua*, de la Real Academia Española. Culmina una labor cuyo primer impulso se dio en la sesión de 20 de octubre de 1848 celebrada por la Real Academia de Ciencias, en la que se acordó preparar un diccionario de los "términos técnicos usados en todas las ramas de las Ciencias que forman el objeto de las tareas de la Corporación". Los altibajos de ese compromiso hasta su cristalización en el presente *Vocabulario* los relata sucintamente en el prólogo Manuel Lora-Tamayo, presidente de la institución.

Con él se "pretende informar al lector culto sobre términos que circulan hoy en la literatura usual, mediante definiciones y un repertorio de palabras apropiadas a las nuevas ideas que en la Ciencia y en la Técnica surgen con inusitada aceleración" (Prólogo).

¿Qué características posee? Se trata de un vocabulario restringido al área de las ciencias exactas, físicas y naturales, a medio camino –mixto– entre la información terminológica (entre la definición de diccionario, diríamos) y la información enciclopédica (que nos describe objetos, técnicas, procesos, etcétera). Se quiere abierto, esto es, no se definen necesariamente todos los términos empleados. Y, sobre todo, apoyado en el uso actual de las voces. Priva la competencia lingüística de la comunidad hablante sobre los purismos y casticismos que nadie domina ni utiliza.

La corporación guardó la cautela de ir editándolo en cuadernillos monográficos para que los cultivadores de las distintas ramas del saber señalaran las enmiendas necesarias. Aunque no se nos indican las respuestas, por los frutos cosechados se ve que los resultados fueron dispares. Lo que no ha impedido que el científico, el divulgador y el hombre de la calle tengan ya a mano una herramienta imprescindible de trabajo. ¿Mejorable?

Alguien hubiera deseado mayor rigor lógico en las definiciones y en las descripciones de muchísimos términos. En general se echa a faltar la mano de un lingüista que depurase las explicaciones; por ejemplo, en la página XII se lee: "en otros casos, se prescinde de la estrica posición alfabética de algunos de los términos que aparecen en la entrada, por motivos evidentemente significativos". Todos los motivos son significativos. El uso de la significación para designar relevancia o importancia, tomado del campo estadístico, está aquí mal aplicado; si se me permite la sugerencia, debiera leerse: "en otros casos, se prescinde de la estricta posición alfabética de algunos de los términos que aparecen en la entrada, por razones de complejidad de una misma estructura, división lógica, agregación u otras de parecido tenor".

Las deficiencias afectan también al fondo del vocabulario, a la selección, proporcionalidad y simetría de las palabras escogidas y ausentes, a la distinta representación de las ciencias. Empecemos por lo segundo. La astrofísica se queda sin el Nobel del año pasado: la nucleosíntesis; pierde más elementos: horizonte de sucesos, núcleo estelar, medio interestelar, restos de supernova, NGC y demasiados más. De la cosmología a la física de partículas: no se llega a la cromodinámica cuántica, monopolos, supersimetrías, conservación de la paridad, gluones... La física clásica no debió dejarse arrebatar el empuje de Arquímedes.

No existe la botánica. Agravio que se torna más doloroso cuanto la zoología y, en particular, la sistemática zoológica, inunda de clases, órdenes y otros grupos taxonómicos las páginas del vocabulario. La ecología se desnaturaliza al verse sin sus conceptos constituyentes: diversidad, estabilidad y complejidad. No entenderá el antropólogo el sacrificio de homínidos y hominoideos y de los instrumentos que pudieron emplear (bifaces, por ejemplo). Se crea, empero, una nueva ciencia, la paleobiología, pretendiendo anular la ya existente paleontología. (Crusafont, eximio cultivador de esta última, se quejaba de no dar su disciplina en la facultad de ciencias biológicas, pues, aseveraba con verdad, la biología se divide en dos: fósil y viviente; aquélla es el ámbito de estudio de la paleontología, ésta de la neontología, o biología en sentido usual.) Nos detenemos en las ciencias de la naturaleza porque son las que han recibido mayor atención por parte de la comisión encargada de redactar las voces y unificar criterios. Sirva ello para resaltar el valor provisional de este *Vocabulario*. La genética y la bioquímica, verdaderas mimadas, habrán de ver incrementado su elenco en próximas ediciones con entradas tan imprescindibles como deriva genética, abordarse con un mismo estereotipo, por razones obvias.

Vayamos a la simetría. Si el compilador cree necesario definir zooplancton no debe olvidar fitoplancton; lo mismo vale para fototaxia y quimiotaxia. Los nucleótidos adenina (A), guanina (G), citosina (C) y timina (T) tienen que abordarse con un mismo esterotipo, por razones obvias.

El campo técnico que pretende cubrir el *Vocabulario* queda bastante escuálido, aun ateniéndonos al mundo de la electrónica y automática.

Investigación y Ciencia reconoce y agradece, a pesar de esas lagunas, el enorme servicio que el *Vocabulario* habrá de prestarle en su labor divulgadora de la ciencia sin miedo a los neologismos, pero sin concesión a barbarismos de ninguna especie. Porque sabemos cuán dura es esa tarea, porque tenemos noticia de la parquedad de medios con que se ha acometido, es por lo que rendimos tributo ante tamaño esfuerzo. Las futuras ediciones, que contarán a buen seguro con un equipo más dilatado, con unos medios más completos (desde vaciados de revistas enteras hasta el recurso al ordenador), tendrán roturado el camino.

La carrera de los físicos

Después de unas largas negociaciones que han durado varios años, el pasado mes de noviembre el gobierno español presentó ante la UNESCO el documento de adhesión al Convenio para la constitución de una Organización Europea de Investigación Nuclear, mediante la cual España se convirtió en el miembro número trece del Laboratorio Europeo de Física de Partículas, abreviadamente conocido por CERN, las siglas de su primitivo nombre (Centre Européen pour la Recherche Nucléaire). Nuestro país se suma así al esfuerzo internacional encaminado a desvelar los últimos componentes de la materia y las características de las fuerzas que rigen entre ellos.

El CERN se constituyó en 1951. En 1954 estableció su laboratorio en la frontera franco-suiza próxima a Ginebra. Nació con el intento de aunar los esfuerzos científicos de los países europeos a fin de poder mantener un nivel de competitividad con los Estados Unidos y la Unión Soviética. Tras más de 25 años de existencia puede afirmarse que el CERN ha constituido un éxito, no sólo en el plano científico, como ve-

remos, sino también como motor del desarrollo tecnológico de los países miembros y como modelo de organización científica internacional. Si bien España fue miembro del CERN desde el año 1961 al 1968, hay que reconocer que no obtuvo de la adhesión otros beneficios que el nacimiento de una comunidad científica que en el transcurso de los años ha ido creciendo y ha influido tanto en la docencia universitaria como en la investigación relacionada con las partículas elementales. En concreto, el sector teórico de esta comunidad constituye el Grupo Interuniversitario de Física Teórica (GIFT) que cuenta con un centenar de doctores y, el sector experimental, que reúne un grupo de investigación importante en la Junta de Energía Nuclear de Madrid y algunos científicos en las Universidades de Valencia y Santander.

La adhesión española se ha realizado ahora en un marco muy distinto. Además de la voluntad gubernamental de fomentar la investigación aumentando sustancialmente los presupuestos dedicados a ella, nuestras empresas son conscientes de que sólo sobrevivirán si realizan esfuerzos importantes de desarrollo tecnológico. Una manera adecuada de garantizar la rentabilidad de unos presupuestos importantes es dedicarlos a programas internacionales que cuentan automáticamente con la garantía de una comunidad científica mucho más avanzada que la nuestra. Una buena vía de fomentar nuestro desarrollo tecnológico es cooperar en una institución como el CERN, que dedica un 50 por ciento de su presupuesto de más de 600 millones de francos suizos a su capítulo de inversiones de alta tecnología. Y desde un punto de vista científico, si bien nuestro nivel ha aumentado muchísimo, nuestra adhesión requiere un mayor esfuerzo en el interior de España, en línea con el Plan Movilizador de Física de Alta Energía (encaminado principalmente a crear nuevos grupos experimentales en distintas universidades españolas). Todos estos aspectos han sido claramente comprendidos tanto por los sectores industriales del país como por los poderes públicos que han refrendado la decisión del consejo de ministros de adherirse al CERN por abrumadora mayoría del Congreso de los Diputados, por asentimiento del Senado y con el apoyo de todos los grupos parlamentarios. Justo es reconocer también que la adhesión ha sido facilitada por las ventajosas condiciones que el CERN ha ofrecido a España y que han sido aceptadas por la totalidad de los países miembros.

Las gestiones para la adhesión española se iniciaron hace tres años, al considerarse que los primeros años de la década serían un buen momento para la integración, de manera que se pudiera preparar con la antelación suficiente la participación en los experimentos del acelerador LEP. Si bien los trámites previos se han alargado algo más de lo que hubiera sido deseable, se produce en un momento de gran interés científico y en el que el CERN acaba de alcanzar uno de los logros más importantes de su historia científica: el descubrimiento, en 1983, de los tres bosones vectoriales intermediarios, los W cargados y los Z^0. Este descubrimiento confirma una de las predicciones de la teoría unificada electrodébil asentada ya sobre el descubrimiento, también en el CERN, hace unos años, de la existencia de las corrientes neutras. La confirmación de la teoría hace pensar a muchos físicos que las ideas actualmente en boga acerca de lo que pueda suceder a energías aún mayores pueden ser ciertas, y esta confianza en la teoría parece justificar el enorme riesgo en tiempo y dinero que implica su verificación. En los próximos lustros una parte sustancial de los recursos de los mayores laboratorios del mundo se dedicará a comprobar las predicciones de las teorías relacionadas con la electrodébil y a intentar arrebatar al CERN el liderazgo mundial que detenta.

En los Estados Unidos los descubrimientos del CERN han alentado a la comunidad de físicos a iniciar seriamente el trabajo encaminado a diseñar una máquina llamada Desertrón, nombre que remite al lugar donde podría establecerse. Se trataría de una máquina capaz de acelerar dos haces de protones en direcciones opuestas a lo largo de un anillo de unos 100 kilómetros de circunferencia. Los protones de cada haz alcanzarían energías de unos 10 TeV (10 billones, o 10^{13}, electronvolt) antes de chocar frontalmente, con lo cual liberarían una energía doble de la mencionada. La energía neta disponible para la materialización de nuevas partículas sería del orden de 1 TeV, es decir, unas 40 veces mayor que la energía que puede extraerse del actual acelerador del CERN. En el pasado junio, un Comité Asesor para Física de Alta Energía del Departamento de Energía de los Estados Unidos votó por diez votos contra siete abandonar la construcción de un acelerador a medio hacer en el Brookhaven National Laboratory, a fin de potenciar la realización del Desertrón. Por unanimidad se otorgó luego máxima prioridad a la construcción de dicho acelerador.

En el pasado octubre, el departamento de energía destinó 18 millones de dólares del proyecto abandonado de Brookhaven a un estudio sobre la viabilidad del acelerador de energía ultraalta. Se espera que en los próximos tres o cuatro años la investigación y el desarrollo de la nueva máquina cueste entre 150 y 200 millones de dólares, estimándose el coste total del aparato en unos dos mil millones de dólares como mínimo. El acelerador entraría en funcionamiento dentro de 10 o 12 años. Aportará datos importantes acerca de la estructura de las partículas que hoy consideramos elementales, así como de algunas características de las teorías actuales (detección de los bosones de Higgs) o bien acerca de otras más recientes (teorías de aforo supersimétricas).

La posibilidad de imaginar una máquina como el Desertrón se debe al importante avance tecnológico que ha permitido el desarrollo de imanes superconductores, capaces de generar campos magnéticos enormes con un costo de funcionamiento mucho menor que los imanes convencionales; los materiales superconductores no ofrecen resistencia al paso de la corriente eléctrica. Tales imanes debían haberse instalado en el acelerador abortado de Brookhaven; mas las dificultades que aparecieron en su construcción explican el retraso del proyecto y su posterior abandono. Resueltos ya los problemas, los imanes superconductores se han instalado en el Tevatrón I, el acelerador del Fermi National Accelerator Laboratory (Fermilab). Este acelerador de blanco fijo, parecido al SPS del CERN, podrá acomodar haces de protones y antiprotones circulando en direcciones opuestas a una energía de unos 700 GeV (700.000 millones de electronvolt). El pasado mes de agosto se logró un haz de protones de 700 GeV y ahora se está trabajando en aumentar la intensidad del haz y en la extracción del mismo para que incida sobre un blanco fijo. Se espera que el Tevatrón I funcione como máquina de blanco fijo hasta el verano de 1985, y, a partir de entonces, como anillos de almacenamiento o colisionador, en el que dos haces choquen frontalmente. Se espera que la energía liberada por la colisión de protones y antiprotones alcance los 2 TeV.

El Tevatrón I es el máximo competidor del actual Supersincrotrón de Protones (SPS) del CERN, el anillo de almacenamiento de protones y antiprotones que ha permitido el descubrimiento de las W y las Z. Una vez que el Tevatrón I empiece a funcionar a pleno rendimiento, cosa que el director de Fermilab, León M. Lederman, espera que

suceda en verano de 1986, superará la energía e intensidad del acelerador del CERN. De ahí el enorme interés por llevar a cabo el máximo número de nuevos experimentos cuanto antes. La energía de la máquina del CERN se aumentará ligeramente hasta 310 GeV por haz y se dedicará un gran esfuerzo a potenciar la intensidad o luminosidad del haz. Hay en proyecto construir un nuevo acumulador de antiprotones, que permitirá un aumento de la luminosidad en un factor 10. Ello garantizará un ritmo de producción de Z y W mucho mayor que el actual.

Por otro lado, el pasado septiembre tuvo lugar en el CERN la ceremonia oficial del inicio de las obras de otra máquina, el gran anillo electrón-positrón, o LEP, que generará 10.000 bosones vectoriales diarios cuando inicie su funcionamiento en 1988. El túnel principal del acelerador tiene 27 kilómetros de perímetro. En la primera fase hará chocar electrones contra positrones a una energía de 60 GeV cada haz. Es posible que dicha energía se aumente hasta 1000 GeV. Aunque la energía generada por los choques es mucho menor que la generada por los protones y antiprotones, una gran fracción de la energía queda disponible en este caso para la creación de nuevas partículas. (Debido a que el protón y el antiprotón están formados por quarks y gluones, la energía suministrada al protón y al antiprotón debe repartirse entre sus varios componentes elementales.) Como no hay predicciones claras acerca de la masa de los bosones de Higgs ni de muchas de las partículas supersimétricas, no podemos afirmar si el LEP podrá descubrirlas o bien habrá que esperar al Desertrón. Además, se está debatiendo la conveniencia de convertir el túnel del LEP en un anillo de protones en el que se podrían acelerar éstos a una energía de unos 8 TeV.

Hasta que el LEP no funcione, la física de electrón-positrón se realizará en dos laboratorios de los Estados Unidos. Por un lado se proyecta mejorar el anillo de almacenamiento de electrones de Cornell, así como construir el colisionador lineal de Stanford (SLC); éste acelerará electrones y positrones hasta alcanzar los 50 GeV. Los haces se separarán, se enviarán en direcciones opuestas y se harán chocar. La construcción costará unos 113 millones de dólares; habrá de estar concluida a finales de 1986. La máquina generará, en abundancia, W y Z; permitirá experimentar el acelerador lineal como una alternativa más barata a la técnica corriente de los anillos de almacenamiento.

En el Deutsches Elektronen Synchroton (DESY) de Hamburgo se empezará el año próximo la construcción de un anillo acelerador (HERA). El nombre hace referencia a la característica distintiva del acelerador: será la única máquina en la que un hadrón, tal como un protón, se haga chocar contra un leptón, tal como el electrón. El diseño permitirá a los físicos examinar detenidamente los efectos de la fuerza nuclear débil sin el enmascaramiento producido por las más intensas fuerzas electromagnéticas o nucleares fuertes. Uno de los principales objetivos de HERA es explorar el campo que rodea a los quarks hasta distancias de 10^{-17} centímetros. Si el quark tiene un tamaño finito podrá verse a este nivel, aunque hará falta esperar al Desertrón para determinar, si las tienen, su forma y estructura.

Otros aceleradores se están desarrollando en China, en la Unión Soviética y en el Japón. Cerca de Beijing se está construyendo un colisionador electrón-positrón de 3 GeV que debe entrar en funcionamiento en 1987. En Rusia, el laboratorio de Serpukhov está preparando un acelerador de protones de 400 GeV, que se proyecta finalizar en 1988, esperándose subir hasta 3 TeV en la década de los noventa y convertirlo, a la vez, en un colisionador. El proyecto japonés Tristán permitirá, en 1986, hacer chocar electrones de 30 GeV contra positrones de igual energía.

Sin control

Los oncogenes provocan cáncer. ¿Cómo? Esos genes son versiones alteradas de otros, normales, que deben desempeñar algún papel beneficioso en la vida celular; probablemente, el efecto de los oncogenes sea una errónea imitación de la actividad de los genes normales. El cáncer, en esencia, es una proliferación incontrolada de células, de ahí que se haya considerado la posibilidad de que al menos algunos oncogenes actúen imitando de manera equivocada la función de factores normales de crecimiento.

En el verano de 1983, los grupos encabezados por Russell F. Doolittle, de la Universidad de California en San Diego, y por Michael D. Waterfield, de la Imperial Cancer Research Fund inglesa, comunicaron el hallazgo de una gran similitud entre la secuencia de aminoácidos determinada por el oncogén denominado *sis* y una de las dos cadenas del factor de crecimiento de origen plaquetario PDGF (*platelet-derived growth factor*), sustancia que induce la división de las células en el proceso de sanación de las heridas. Pocos meses después, el grupo dirigido por Stuart A. Aaronson, del Instituto Nacional del Cáncer, descubría semejanzas estructurales e inmunológicas entre el producto proteico del oncogén y PDGF. Steven F. Josephs y colaboradores, del Instituto Nacional del Cáncer, y el grupo de Aaronson han logrado concretar la relación. Determinaron la secuencia nucleotídica de la versión humana normal de *sis*, descubriendo que codificaba una cadena de PDGF. A lo que se ve, el oncogén determina un factor de crecimiento que reproduce la función de PDGF, aunque de manera incorrecta.

Se acaba de descubrir ahora la relación entre otro oncogén, *erb-B*, y el factor humano de crecimiento epidérmico (EGF, por *epidermal growth factor*). El trabajo, del grupo de Waterfield y los grupos de Joseph Schlessinger, del Instituto Weizmann de Ciencia, y Axel Ullrich, de Genentech, Inc., se publica en *Nature*. Los autores estaban empeñados en el estudio del receptor del factor de crecimiento: una proteína compleja implantada en la membrana celular a la que se enlaza el EGF. La unión desencadena una señal que promueve la síntesis de ADN y la división celular. El receptor lo forman diversos péptidos, breves cadenas proteicas; los autores han aislado 14 de ellos. Su análisis revela que las secuencias de aminoácidos de seis de los péptidos están muy emparentadas con los segmentos de la secuencia determinada por *erb-B*. (El oncogén se aisló a partir de un virus que provoca la leucemia en los pollos.) Deducen los investigadores que un virus infeccioso debió hacerse con parte del gen de pollo que determina el receptor de EGF, incorporándolo luego a su ADN. Se tienen pruebas de que el oncogén determina las porciones del receptor que se ubican en el interior de la membrana y se extienden al interior de la célula, y de que no determina la parte más externa del receptor, aquella a la que se enlaza el EGF.

Señalan Waterfield y sus colegas que, de los trabajos con PDGF y EGF, cabe deducir que son dos los mecanismos por los que un oncogén podría subvertir la regulación normal del crecimiento. En el caso de *sis*, el oncogén parece determinar una proteína que simula la actividad del propio factor de crecimiento. Por el contrario, todo indica que *erb-B* codifica un receptor de EGF defectuoso. En vez de emitir adecuadamente una señal que incite el crecimiento, el receptor incompleto quizá genere continuamente, por cuenta propia, una señal equivalente, provocando con ello un crecimiento sin control.

Origen de hominoideos y homínidos

Descubrimientos realizados durante los cinco últimos años han permitido establecer con mayor rigor la divergencia de los antropoides a partir de los monos del Viejo Mundo y la reciente del hombre a partir de aquéllos

David Pilbeam

Nuestro conocimiento de la evolución humana ha registrado grandes progresos durante la postrera generación, especialmente a lo largo de los últimos cinco años. En ese orden, desde la década de 1960, la paleoantropología ha dejado de ser una disciplina que interesaba sólo a los antropólogos físicos y a unos cuantos paleontólogos. Se ha convertido en un amplio campo de investigación multidisciplinar que requiere la colaboración de geólogos, ecólogos, biólogos moleculares, zoólogos, estudiosos de la conducta animal y hasta el auxilio de químicos y físicos.

En la clasificación linneana de los seres vivos, el hombre pertenece al orden Primates, que incluye además a antropoides, monos y a prosimios como los lemúridos. Dentro de ese orden se encuadra la superfamilia Hominoidea, que abarca al hombre y los antropoides. Bajo esta superfamilia se abriga la familia Hominidae, que comprende al hombre y sus parientes, extinguidos, más próximos a él que los antropoides.

Permítanme revisar de manera breve cómo consideraba hace algo más de cinco años un destacado antropólogo físico, Sherwood L. Washburn, de la Universidad de California en Berkeley, la evolución de hominoideos y homínidos, y contrastar esa visión con la interpretación actual [véase "La evolución del hombre", por Sherwood L. Washburn; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 1978]. En aquel momento, los revolucionarios progresos alcanzados en geología y biología molecular cuestionaban ideas establecidas sobre geografía y cronología de la evolución humana y sobre las relaciones biológicas que ligan al hombre con los demás primates superiores. Por ejemplo, los aportados por la biología molecular habían facilitado la reconstrucción del origen de los primates. Ello no obstante, varios antropólogos físicos manifestaban su escepticismo acerca de la hipótesis avanzada por los biólogos moleculares, según la cual los antropoides africanos (chimpancés y gorilas) guardaban con el hombre un parentesco más estrecho que los asiáticos (orangutanes y gibones). La mayor sorpresa, sin embargo, la constituyó la posibilidad, defendida por los biólogos moleculares, de que los homínidos se hubiesen separado de los antropoides de estirpe africana hace bastante menos que 10 millones de años.

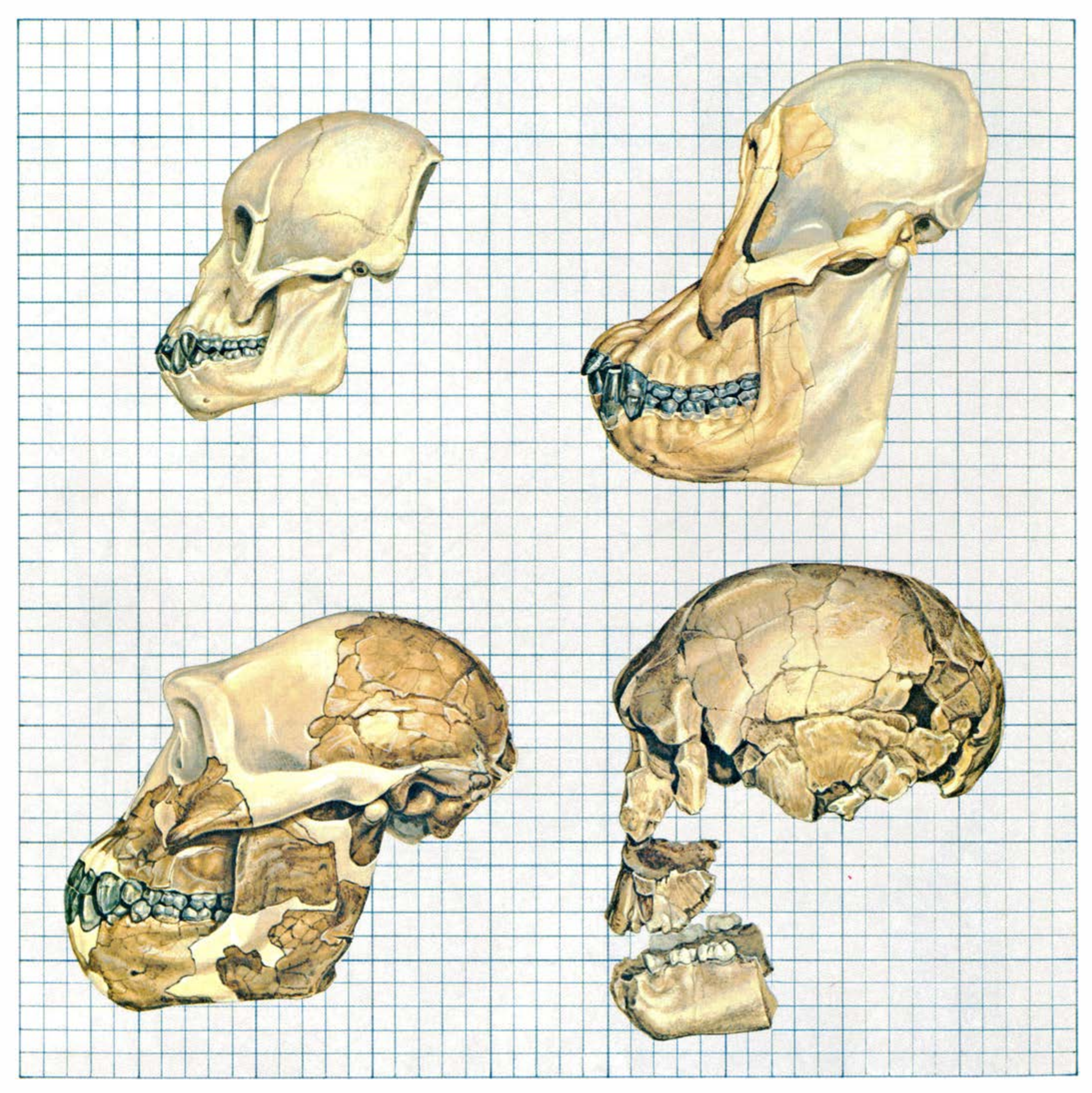
El artículo de Washburn suponía también que *Ramapithecus*, un hominoideo miocénico ampliamente extendido por el Viejo Mundo, podía haber sido el antepasado común del hombre y de todos los grandes antropoides actuales. Por otra parte, el descubrimiento, en Etiopía, de *Australopithecus afarensis* (bien conocido por un esqueleto incompleto, bautizado con el nombre de "Lucy") y, en Tanzania, de las famosas impresiones de pisadas de Laetoli mostraban que, hace más de 3,5 millones de años, había en Africa hominoideos primitivos: primates de encéfalo reducido que vivían en el suelo, adoptaban la marcha bípeda y estaban provistos de caninos relativamente pequeños, no prominentes. Los descubrimientos de Etiopía y Tanzania revelaron que el bipedismo fue la adaptación evolutiva primera, y fundamental, de cuantas desarrollaron los homínidos. Por analogía con los chimpancés se deducía que estos homínidos primitivos probablemente utilizaran la madera y otros objetos naturales como herramientas. El contraste entre los pequeños caninos de los homínidos y los salientes de los chimpancés sugería que, entre aquéllos, la misión agresiva de los caninos se había sustituido ya por el empleo de herramientas.

Al cabo de otro millón de años, según el artículo de Washburn, habían evolucionado en Africa homínidos con encéfalo desarrollado. Fabricaban útiles de piedra y convivían con una especie robusta (es decir, provista de un esqueleto macizo y de una fuerte dentición) de *Australopithecus*, que se extinguió un millón de años más tarde. Con anterioridad, y de ello hace un millón y medio de años, había hecho aparición un homínido más evolucionado: *Homo erectus*. La asociación de sus útiles de piedra con huesos de animales se interpretó como una clara señal de que el hábito cazador había llegado a ser un atributo de homínido mucho antes de que el encéfalo humano alcanzase su tamaño actual.

El tamaño del encéfalo y la complejidad del utillaje fue aumentando lentamente hasta hace unos 100.000 años, cuando surgió un homínido todavía más evolucionado: *Homo sapiens*. Tales progresos constituyen, no obstante, una prueba indirecta de que el encéfalo humano experimentaba una reorganización. Con la aparición de *H. sapiens* el ritmo de transformación de los modelos de utillaje lítico empezó a acelerarse. Los cambios anatómicos evolutivos se manifestaron especialmente en el cráneo. Así surgió, hace menos de 40.000 años, el hombre moderno, que rápidamente se difundió por todo el Viejo Mundo. Al mismo tiempo, el ritmo de evolución del comportamiento, según se deducía de los cambios observables en el instrumental lítico y otros artefactos, se acercaba a lo que podríamos esperar de una conducta cultural humana "normal". Washburn finalizaba su artículo sugiriendo que el lenguaje humano, que posiblemente no existió antes de la presencia del hombre anatómicamente moderno, catalizó la evolución del comportamiento, aunque no existan pruebas anatómicas que apoyen ese punto.

En los cinco años transcurridos desde la publicación del artículo de Washburn se han cosechado nuevos e importantes descubrimientos relativos a los fósiles, y no todos en el campo; se han publicado descripciones más completas de fósiles ya conocidos; los paleoantropólogos han podido interpretar mejor sus datos aprovechando la información de los etólogos y han prestado mayor atención al notable desarrollo de otras ciencias naturales. Estas tendencias han conducido la disciplina hacia una mayor integración con el resto de la comunidad biológica.

Al mismo tiempo, han aumentado las dudas sobre el grado de confianza que puede inspirar cualquier "relato" de la evolución humana. ¿Qué precisión y qué fiabilidad pueden alcanzar esas reconstrucciones? Cuando se pretende abordar los homínidos del pasado con la óptica actual surgen problemas irresolubles. Al fin y al cabo, los antiguos homínidos eran muy distintos de cualquier forma actual. Diferencias que se han ignorado en muchos casos, contemplando los antiguos homínidos cual si de seres humanos actuales se tratara. Permítanme que revise algunos de



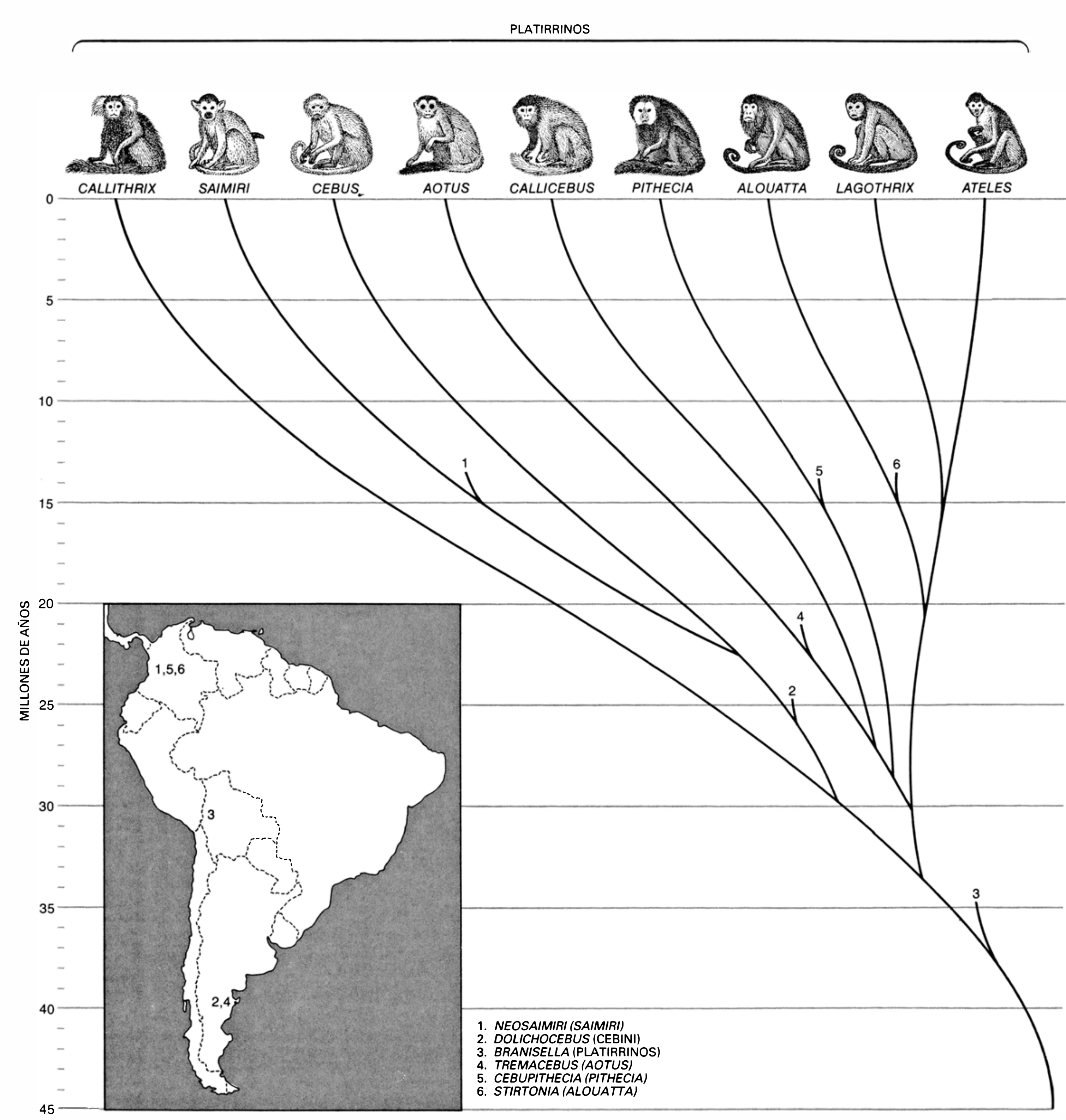
1. PERFIL DE CUATRO CRANEOS FOSILES que ejemplifican estadios decisivos en la filogenia de los hominoideos, a partir de un grupo ancestral de monos del Viejo Mundo, y en la reciente divergencia de los homínidos a partir de un grupo ancestral de hominoideos. En la parte superior izquierda figura el antropoide mejor conocido del Mioceno inferior, *Proconsul africanus*, un primate de la talla de un babuino, que se asemejaba, seguramente, al antepasado común de todos los antropoides y el hombre. En la parte superior derecha, *Sivapithecus*, antropoide del Mioceno superior, de gran tamaño, conocido inicialmente por piezas dentarias y fragmentos de mandíbula descubiertos alrededor del 1900 al pie del Himalaya. Quizá fuera el antepasado del único gran hominoideo viviente de Asia, el orangután. En la parte inferior izquierda, el más antiguo homínido del Plioceno africano que se conoce, *Australopithecus afarensis*, una especie que ya se desplazaba erecta en una época comprendida entre hace dos y cuatro millones de años. En la parte inferior derecha está *Homo habilis*, el homínido de gran encéfalo encontrado por vez primera en 1972 en Kenia. Vivió en el sur y este de Africa durante algunos cientos de milenios, hace unos dos millones de años. Medio millón de años después apareció *Homo erectus*, el predecesor inmediato de *H. sapiens*.

los problemas, empezando por la evolución de los hominoideos, de cuyo grupo surgieron los homínidos.

Evolución de los hominoideos

La añeja polémica entre antropólogos físicos y biólogos moleculares a propósito del modelo y la cronología de la evolución de los hominoideos está resuelta hoy en sus líneas fundamentales. Muchos paleontólogos (y especialistas en anatomía comparada) aceptan los modelos moleculares que muestran cómo los antropoides africanos son genéticamente muy parecidos al hombre; los asiáticos poseen alrededor del doble de diferencias, reflejo de que el antepasado común de los homínidos y del chimpancé y el gorila vivió hacia la mitad del tiempo transcurrido desde la existencia del último antepasado común de todos los grandes hominoideos.

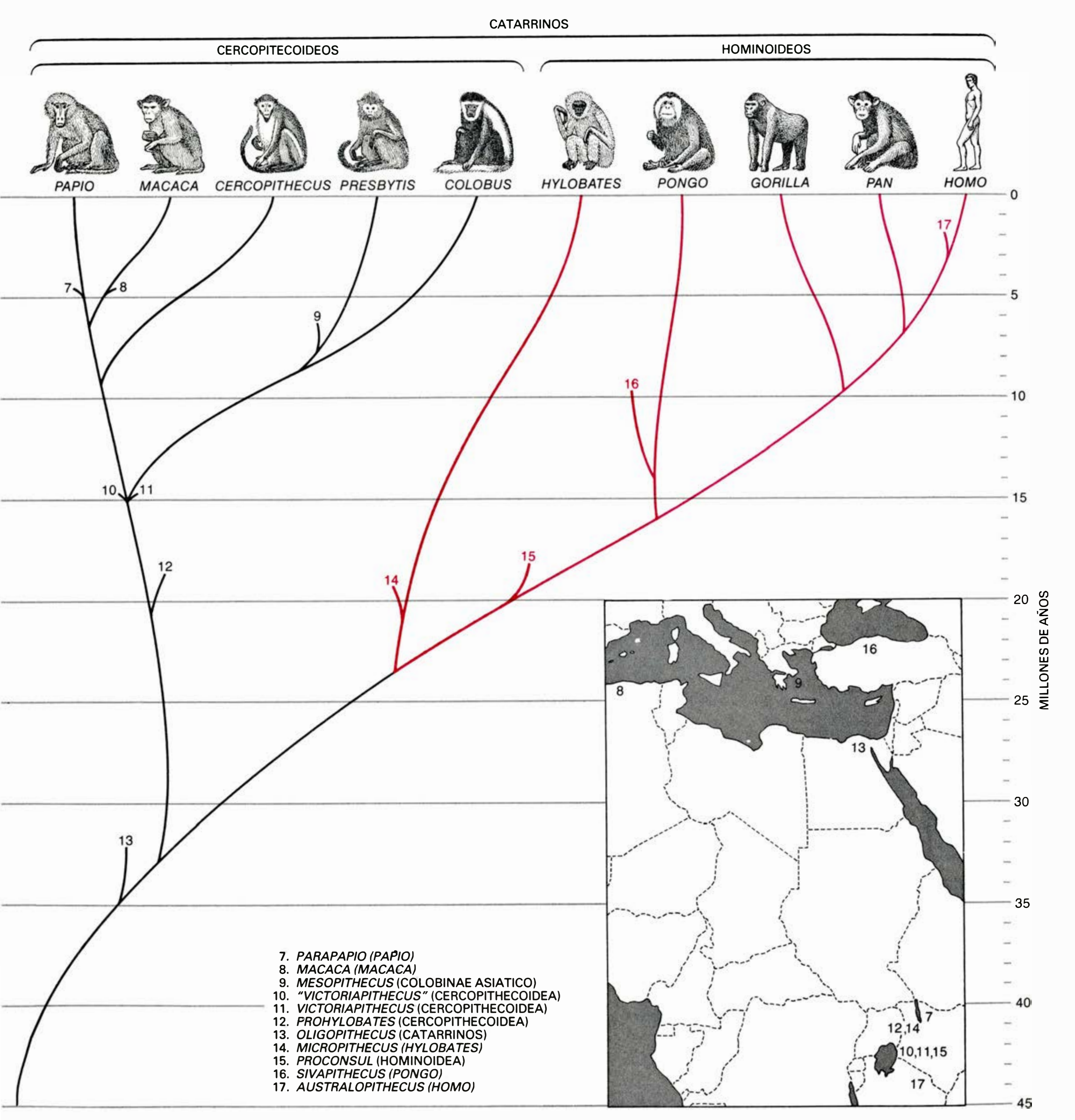
Por su parte, la anatomía comparada nos enseña que los modelos de semejanza morfológica entre hominoi-



2. SECUENCIA RAMIFICADA de los primates superiores desde hace 45 millones de años hasta ahora, representada bajo los dos epígrafes de la parte superior, los platirrinos, o monos del Nuevo Mundo, a la izquierda, y los catarrinos, o monos del Viejo Mundo, a la derecha. La filogenia se basa en datos bioquímicos: ensayos de genética molecular revelan pequeñas diferencias en la secuencia de aminoácidos de una misma proteína en las distintas

deos vivientes constituyen una confirmación de los descubrimientos moleculares. Los grandes antropoides y los homínidos no constituyen lo que se conoce por grupo monofilético, es decir, no compartieron un último antepasado común tras la separación de la línea que condujo al hombre; antes bien, los antropoides africanos y el hombre son monofiléticos respecto a los asiáticos. (En honor a la verdad hay que recordar que, tiempo atrás, algunos anatomistas habían hablado ya de esa hipótesis.)

Ello indica que ciertos rasgos significativos de los antropoides, como la ausencia de cola, deben haberse conservado a partir del último antepasado común de todos los hominoideos, o los han adquirido, por su cuenta, todos los antropoides. Instados por los descubrimientos moleculares, los morfólogos están revisando las características anatómicas de los hominoideos y sus semejanzas, al tiempo que ahondan, con mayor detalle, en los procesos de desarrollo embriológico y sus controles genéticos.



especies, por ejemplo. La datación concreta de los enlaces se apoya en la edad de los fósiles y otros tipos de datos geocronológicos. Los mapas a derecha e izquierda indican dónde se descubrieron los más antiguos fósiles representativos de los géneros. El nombre que sigue al de cada género fósil indica su relación con las formas actuales. Así, *Sivapithecus* se relaciona con el orangután *Pongo*, pero *Proconsul* guarda parentesco con todos los hominoideos.

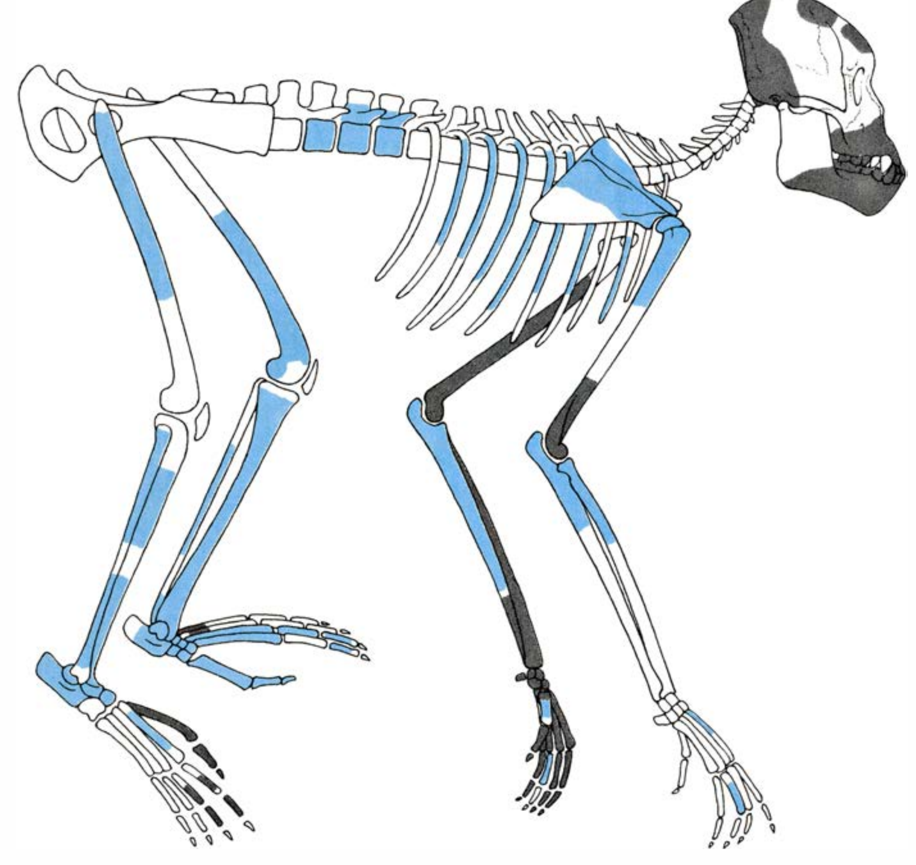
Estos "nuevos" modelos moleculares de ramificaciones no son incompatibles con el registro fósil de los hominoideos. Pasó ya la hora en que muchos paleontólogos colocaban el punto de partida de los homínidos en el Mioceno medio, hace 15 o 16 millones de años, y en que algunos biólogos moleculares sostenían que toda la radiación hominoidea se había producido en los últimos 10 millones de años y, la separación de la rama homínida, hace solamente cuatro millones. Una estimación aceptable fijaría hoy la radiación de todos los grandes antropoides a partir de un lote ancestral en el Mioceno medio, con la separación de los homínidos a partir de una línea de antropoides africanos del Mioceno superior, hace de siete a ocho millones de años.

¿Por qué se interpretó mal el registro fósil de los hominoideos, al menos por oscuros paleontólogos, como yo mismo? Son varias las razones. En primer lugar, se había concedido un valor desproporcionado al registro fósil como fuente de información sobre la secuencia de ramificación evolutiva. Sabemos hoy que el registro molecular aporta más datos que el registro fósil sobre el modelo de ramificación de los hominoideos. (Lo que no empece que el registro fósil persista como la única fuente de conocimiento directo de los estadios evolutivos del pasado.) Ha favorecido los errores de interpretación el hecho de que el registro fósil de los hominoideos anterior a los últimos cuatro millones de años de evolución de los homínidos estuviera fechado de manera fragmentaria e insuficiente hasta hace poco. Comprendía casi exclusivamente dientes y fragmentos pequeños de mandíbulas, partes del cuerpo que raramente dan buena información en cuestiones de taxonomía. Las partes equivalentes del cuerpo de los mamíferos actuales no sirven de mucho a la hora de determinar a qué especie pertenecen o reunir especies en grupos taxonómicos superiores.

Hallamos una tercera fuente de error en la enorme diversidad reinante entre los hominoideos del Mioceno medio y superior, variabilidad que no caracteriza a los grandes hominoideos actuales, de los que sólo existen cinco géneros. Cuando nos enfrentamos con todos los restos de hominoideos fósiles, lo primero que sobresale es la elevada heterogeneidad del grupo: cada especie es singular en muchos aspectos, lo que ha dificultado notablemente la construcción de la filogenia de los hominoideos actuales apoyándonos en la secuencia de ramificación de las formas fósiles. Más arduo resulta enlazar especies fósiles con otras actuales.

Importantes descubrimientos de nuevos hominoideos del Mioceno han transformado la situación. Partes esqueléticas (rostros, cavidades craneanas y extremidades) que se habían interpretado erróneamente, y otras descubiertas hace poco, ofrecen ahora una sugestiva y hasta sorprendente imagen de las relaciones filogenéticas y de la naturaleza de los antiguos hominoideos. Se puede ya vislumbrar cómo vivían y qué tipo de relaciones ecológicas mantenían.

Al mismo tiempo, análisis moleculares recientes nos ayudan a esclarecer y extender nociones concernientes al modelo y la cronología de la evolución de los hominoideos; ejemplo de ello es el trabajo de Charles G. Sibley y Jon Ahlquist, de la Universidad de Yale, que hibridaron ADN de distintas especies de primates para establecer las diferencias y similitudes de sus secuencias de nucleótidos. Poco a poco, la paleoantropología está superando la etapa en la que el registro fósil no contribuía en nada a la comprensión de los modelos filogenéticos, para adentrarse en otra donde constituye un componente de una síntesis que hace compatibles datos de todas clases: fósiles, anatómicos, moleculares y de desarrollo.

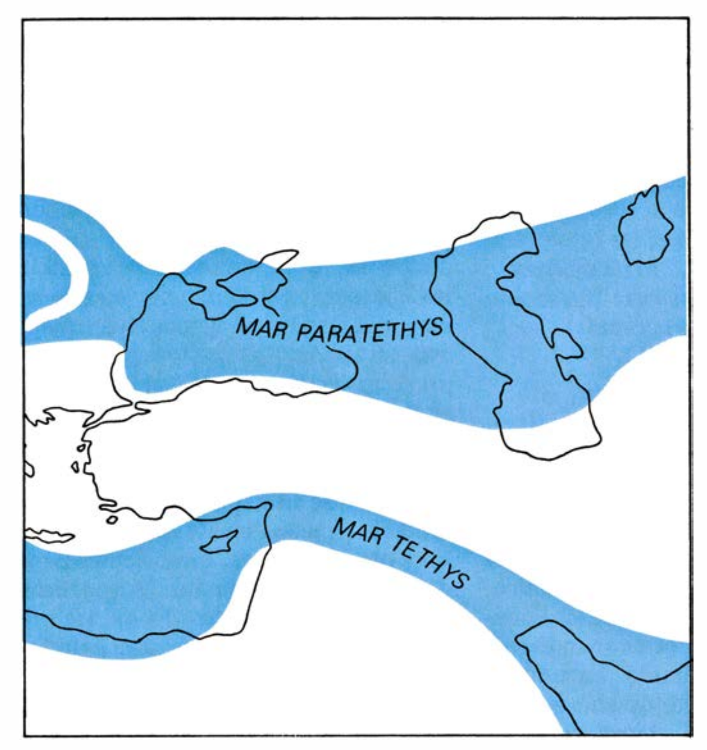


3. **LOS FRAGMENTOS DE PROCONSUL que halló en su descubrimiento Tom Whitworth, en 1951, se señalan en trama gris en la reconstrucción de este hominoideo cuadrúpedo. Las restantes partes del esqueleto (*color*) las encontraron recientemente, en coleciones de museo, Alan Walker y Martin Pickford, de Johns Hopkins y el Museo Nacional de Kenia, respectivamente. Las zonas en blanco, como la pelvis, gran parte de la columna vertebral y parte del cráneo y la mandíbula, no se han descubierto todavía.**

La radiación hominoidea

Una exposición de la radiación de los hominoideos que sintetizara cuanto hoy se afirma pudiera ser la que aquí esbozaremos. En primer lugar, no está claro cuándo se separaron los grandes antropoides de sus parientes, los monos del Viejo Mundo. (Los monos del Nuevo no desempeñaron papel alguno en la evolución hominoidea.) Parece bastante seguro, no obstante, que la división se produjo después del Oligoceno medio (hace unos 30 millones de años) y antes del Mioceno inferior (hace 20 millones de años). Sea como fuere, la radiación de los hominoideos ocurría durante el Mioceno inferior o medio (hace 15 o 20 millones de años); algunas líneas de este grupo moderadamente próspero no se extinguieron hasta el Mioceno superior (hace seis u ocho millones de años).

Ni sabemos con certeza cuándo se separaron, de los grandes hominoideos, los hominoideos de talla reducida, los gibones asiáticos. La división quizá la registren algunos fósiles de primates



4. AFRICA Y EURASIA colisionaron hace 20 millones, en el Mioceno inferior. Hasta entonces el Mar de Tethys (*color*) separaba las dos masas continentales, como se muestra a la izquierda. Durante el Mioceno inferior, hace 17 millones de años, el mar se retrajo (*derecha*), creando un puente continental que permitió el paso de animales entre Africa y Eurasia. Entre los que migraron al continente septentrional figuraban los hominoideos africanos.

del Mioceno inferior, aunque éste es un punto controvertido. Mejor documentada se halla la bifurcación de los grandes antropoides en especies asiáticas y africanas durante el Mioceno medio, esto es, hace unos 16 millones de años. El orangután es el único superviviente de un grupo asiático de antropoides del Mioceno medio y superior que conoció un amplio polimorfismo y expansión.

Para nuestra desdicha, no se posee prácticamente representación fósil de la rama de hominoideos africanos para la mayor parte del Mioceno. Pero el registro molecular permite inferir una división, durante el Mioceno superior, de los primeros gorilas, y, a continuación, de chimpancés y homínidos (hace de 6 a 10 millones de años); se sabe que en Africa oriental había homínidos que caminaban erguidos hace, al menos, 3,5 o 4 millones de años. Mientras no dispongamos de mejor registro fósil (sobre todo de antropoides africanos), sólo podremos conjeturar la cronología y la secuencia precisa de ramificación de dichas líneas, así como la naturaleza de sus primitivos miembros, homínidos más antiguos incluidos.

Si retrocedemos al Oligoceno, el registro de primates africanos resulta rico en comparación. Elwyn L. Simons, de la Universidad de Duke, ha sido un cazador afortunado de primates fósiles en El Fayum, Egipto, en varias campañas desde 1961. A partir de 1977, ha descubierto, junto con sus colaboradores John G. Fleagle, de la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook, y Richard F. Kay, de la Universidad de Duke, materiales muy notables. Piezas importantes del esqueleto de *Aegyptopithecus*, una especie conocida hasta ahora sólo por un cráneo recuperado tiempo atrás por el propio Simons, y de *Apidium* están ahora dispuestas para el estudio. Hasta *Parapithecus* y *Propliopithecus*, tan escasamente representados, se hallan bien caracterizados.

Esos fósiles representan un grupo diversificado de primates arborícolas no especializados que alcanzarían la categoría biológica de monos desde el Oligoceno medio, hace de ello 30 millones de años por lo menos. Sin embargo, no se trataba de primates primitivos parecidos a los lemures, sino que presentaban una semejanza general con los monos actuales del Nuevo Mundo. Aunque resultan demasiado primitivos y distintos de los actuales primates superiores del Viejo Mundo para deducir si corresponden a una época anterior o posterior a la de la divergencia de los hominoideos del Viejo Mundo.

El Mioceno inferior de Africa oriental constituye una feliz excepción en lo concerniente al escaso registro fósil del conjunto de Africa. Recolecciones efectuadas durante los últimos 50 años en Kenia y Uganda han proporcionado hasta un millar de fósiles de primates superiores que poseen una antigüedad comprendida entre los 17 y los 22 millones de años y que representan, con toda seguridad, líneas de hominoideos de un período posterior a su divergencia de los monos del Viejo Continente. Gracias, sobre todo, a los trabajos de Peter Andrews, del Museo Británico (Historia Natual), se conoce bien la paleoecología de la época. El paisaje estaba constituido por áreas forestadas, de bosque abierto y praderas, con predominio del bosque. Por lo menos seis especies de hominoideos habitaban la selva y el bosque abierto. Una de ellas, *Proconsul africanus*, se convirtió, durante mucho tiempo, en el antropoide miocénico mejor descrito y cuyo conocimiento ha ido en progreso.

De tamaño pequeño, su talla era la de un babuíno. *Proconsul* ha desempeñado un papel de primer orden en la concepción de la evolución de los hominoideos. La especie estaba representada hasta hace poco por sólo una extremidad anterior casi entera, una mandíbula, fragmentos del cráneo y algunos huesos del pie, todo de un mismo individuo, y un cráneo bastante completo de otro individuo, así como fragmentos de una extremidad, dientes y mandíbulas. Alan C. Walker, de la Universidad Johns Hopkins, y Martin Pickford, del Museo Nacional de Kenia, descubrieron luego (en colecciones de museo y de laboratorio) muchas más piezas atribuidas al individuo de la "extremidad anterior", lo que ha permitido reconstruir buena parte de su esqueleto.

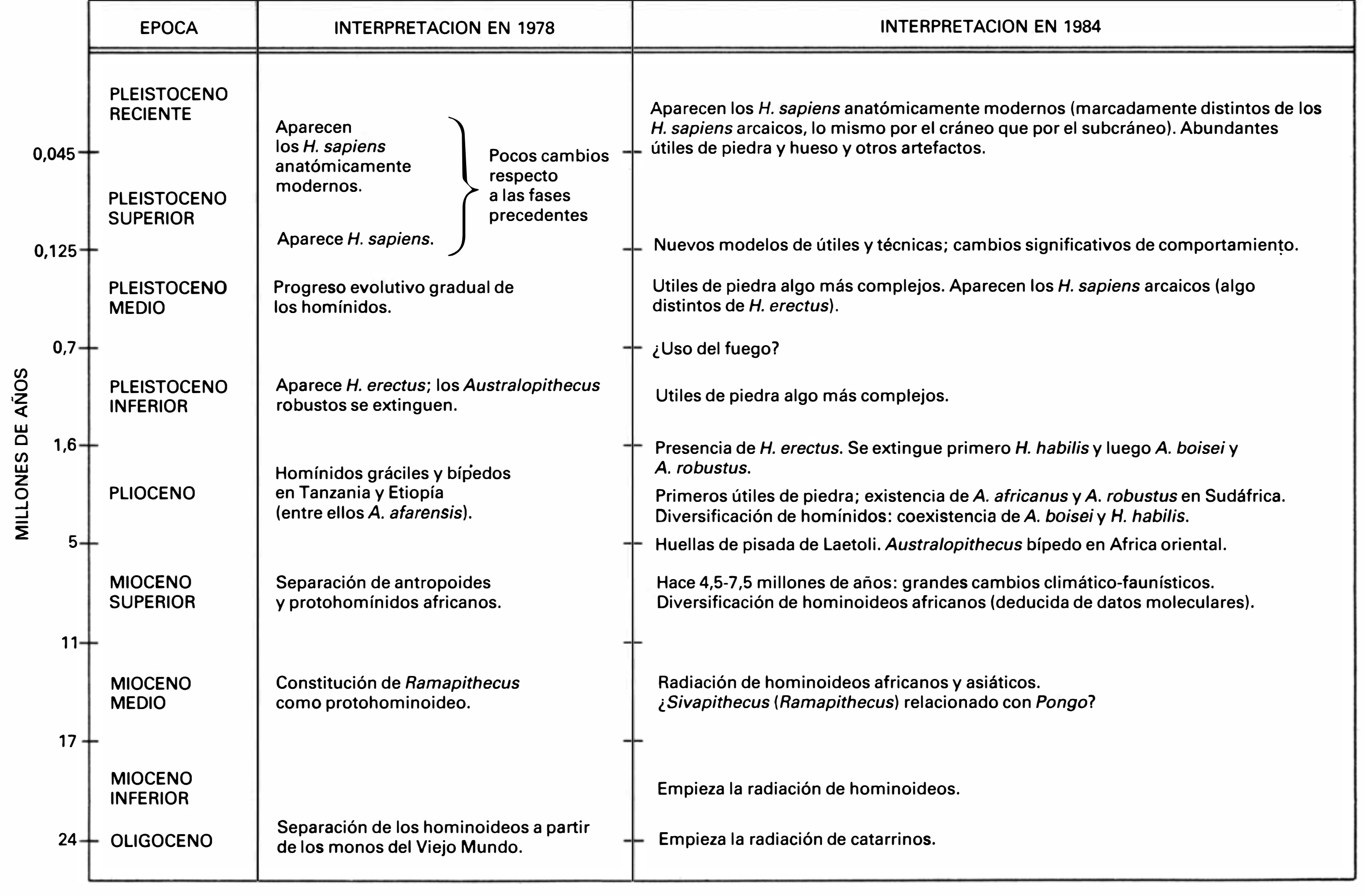
Proconsul ha recibido interpretaciones contradictorias de distinta índole. Había quien, en un extremo del abanico de opiniones, reconocía en él una forma demasiado especializada para constituir el antepasado de ningún homínido actual, si es que se trataba en verdad de un hominoideo. Otros lo consideraban un antiguo hominoideo no especializado; para otros era antepasado del chimpancé. La inclusión del nuevo material ha arrojado cierta luz sobre el asunto. *Proconsul*, según la opinión actualmente más aceptada, era un hominoideo, si bien poco especializado y primitivo. Se trataba de un "antropoide en formación", arborícola y frugívoro, con notable dimorfismo sexual en lo que a la talla se refiere. No se parecía a ninguno de los actuales primates superiores en su porte general. Las articulaciones de sus extremidades anteriores, así como las del pie, recordaban las del chimpancé, el carpo semejaba el de un mono y sus vértebras lumbares se parecían a las de los gibones. Los demás rasgos le eran exclusivos, así como su morfología general. En *Proconsul* hallamos una instructiva lección quienes nos interesamos por la evolución: las relaciones atribuidas al animal dependieron de qué parte de su cuerpo se examinó. Cuando un animal fósil se recupera pieza a pieza, en fragmentos desenterrados a lo largo de un determinado intervalo de tiempo, el orden de descubrimiento de las distintas partes puede afectar las interpretaciones filogenéticas, particularmente en los casos de una especie "en mosaico", como es el de *Proconsul*.

Driomorfos y ramamorfos

El final del Mioceno inferior, hace unos 17 millones de años, estuvo marcado por un acontecimiento geológico de sobresaliente significación: la deriva continental produjo la unión de Africa y Arabia con el continente eurasiático, lo que facilitó la migración de los hominoideos africanos (y otros mamíferos) al resto del Viejo Mundo. La colisión inició el levantamiento de grandes edificios montañosos: los Alpes, en Europa, las montañas del Taurus, en Turquía, y las del Zagros, en Irán. El mar de Tethys desapareció y se modificaron los modelos de circulación oceánica y atmosférica; se produjeron así variaciones importantes en el clima y en el medio ambiente.

Durante el Mioceno medio y superior, entre 5 y 17 millones de años atrás, el clima eurasiático fue de carácter estacional. Con inviernos más benignos que los actuales. Grandes áreas ocupadas hoy por praderas, o incluso desérticas, eran entonces forestadas; los bosques cubrían una extensión mayor. La fauna de mamíferos refleja esta situación: los pastadores de las praderas eran escasos, mientras que abundaban los ramoneadores de monte alto y bosque.

El registro fósil de hominoideos eurasiáticos de este período está representado, principalmente, por mandíbulas y dientes sueltos, insuficientes para establecer unas relaciones filogenéticas claras. De manera aproximada, los hominoideos se dividen en dos grandes grupos. Llamamos al primero, con cierta informalidad, el de los driomorfos, por encerrar varias especies europeas del género *Dryopithecus*, un primate dotado de diversas características hominoideas primitivas. El segundo grupo recibe el nombre colectivo de ramamorfos, porque engloba el *Ramapi-*



MILLONES DE AÑOS	EPOCA	INTERPRETACION EN 1978	INTERPRETACION EN 1984
	PLEISTOCENO RECIENTE	Aparecen los *H. sapiens* anatómicamente modernos.	Aparecen los *H. sapiens* anatómicamente modernos (marcadamente distintos de los *H. sapiens* arcaicos, lo mismo por el cráneo que por el subcráneo). Abundantes útiles de piedra y hueso y otros artefactos.
0,045		Pocos cambios respecto a las fases precedentes	
	PLEISTOCENO SUPERIOR	Aparece *H. sapiens*.	
0,125			Nuevos modelos de útiles y técnicas; cambios significativos de comportamiento.
	PLEISTOCENO MEDIO	Progreso evolutivo gradual de los homínidos.	Utiles de piedra algo más complejos. Aparecen los *H. sapiens* arcaicos (algo distintos de *H. erectus*).
0,7			¿Uso del fuego?
	PLEISTOCENO INFERIOR	Aparece *H. erectus*; los *Australopithecus* robustos se extinguen.	Utiles de piedra algo más complejos.
1,6			Presencia de *H. erectus*. Se extingue primero *H. habilis* y luego *A. boisei* y *A. robustus*.
	PLIOCENO	Homínidos gráciles y bípedos en Tanzania y Etiopía (entre ellos *A. afarensis*).	Primeros útiles de piedra; existencia de *A. africanus* y *A. robustus* en Sudáfrica. Diversificación de homínidos: coexistencia de *A. boisei* y *H. habilis*.
5			Huellas de pisada de Laetoli. *Australopithecus* bípedo en Africa oriental.
	MIOCENO SUPERIOR	Separación de antropoides y protohomínidos africanos.	Hace 4,5-7,5 millones de años: grandes cambios climático-faunísticos. Diversificación de hominoideos africanos (deducida de datos moleculares).
11			
	MIOCENO MEDIO	Constitución de *Ramapithecus* como protohominoideo.	Radiación de hominoideos africanos y asiáticos. ¿*Sivapithecus* (*Ramapithecus*) relacionado con *Pongo*?
17			
	MIOCENO INFERIOR		Empieza la radiación de hominoideos.
24	OLIGOCENO	Separación de los hominoideos a partir de los monos del Viejo Mundo.	Empieza la radiación de catarrinos.

5. EVOLUCION DE LOS HOMINOIDEOS, resumida en este cuadro que abarca desde el Oligoceno, abajo, hasta el Pleistoceno reciente, arriba; registra los cambios habidos estos últimos años en su interpretación. Las cifras situadas entre las subdivisiones geológicas indican las fechas terminales de cada subdivisión, expresadas en millones, o fracción de millón, de años anteriores a la actualidad. La interpretación de 1978 sobre el tema aparece en la parte izquierda del cuadro, junto con los datos de fósiles o pruebas arqueológicas que apoyan esa opinión. A la derecha, la interpretación aceptada hoy.

thecus y géneros afines. Los ramamorfos se distribuían especialmente por Asia; diferían de otros hominoideos del Mioceno en algunas características propias de los hominoideos modernos.

Edward Lewis, estudiante de licenciatura de Yale que trabajaría después para el Servicio Geológico de los Estados Unidos, bautizó con el nombre de *Ramapithecus* a un fragmento fósil del maxilar superior de un primate de la India que había descubierto en 1932. Hoy sabemos que su antigüedad se remonta algo más allá de los siete millones de años. Durante la década de 1960 se atribuyeron al mismo género otras mandíbulas y dientes de primates descubiertos en la India, Pakistán y otros puntos del Viejo Mundo. Se le suponía distinto de sus contemporáneos *Dryopithecus* y *Sivapithecus*, este último era primate de la India, que se interpretaban más próximos a los antropoides. Los varios restos recogidos denunciaban unas mandíbulas robustas y con molares anchos en una espesa capa de esmalte. Estos caracteres, y algunos más, recuerdan los de los recientes homínidos africanos del género *Australopithecus*. Las semejanzas indujeron a varios paleontólogos, y me incluyo entre ellos, a sostener que *Ramapithecus* era un auténtico homínido primitivo, que los homínidos se separaron de los demás hominoideos de Africa como mínimo hace 15 millones de años y que, por tanto, la fecha de la división de cuatro millones de años, basada en datos moleculares, era absolutamente incorrecta.

En 1973 inicié un proyecto de investigación en colaboración con el Servicio Geológico del Pakistán, centrado en la búsqueda del nuevo material de *Ramapithecus*. Las formaciones ricas en fósiles donde aún seguimos trabajando son el resultado de la denudación del Himalaya en su levantamiento; se conocen como series de los Siwalik. Su edad va del millón a 17 millones de años y constituyen un importante escalón que se sigue a lo largo del flanco meridional de la gran cordillera, desde Afganistán hasta Birmania. En la sección paquistaní de la formación de los Siwalik tuve la fortuna de descubrir varios nuevos hominoideos fósiles: ejemplares de *Ramapithecus* y su pariente *Sivapithecus*, así como miles de otros mamíferos fósiles.

Nuestro amplio equipo interdisciplinar ha establecido una secuencia de cambios faunísticos durante los 16 millones de años de depósito en la región y ha realizado considerables progresos en la reconstrucción de sus comunidades animales del pasado. Resulta claro, a partir del nuevo material, que *Ramapithecus* y *Sivapithecus* son mucho más semejantes de lo que yo había pensado; cabe, incluso, que pertenezcan al mismo género.

En cualquier caso, los nuevos restos de *Sivapithecus*, un cráneo parcial y huesos aislados de extremidades, muestran determinados rasgos, particularmente en el rostro y el paladar, que recuerdan los del único gran antropoide viviente de Asia, el orangután (*Pongo pygmaeus*). No remiten, en cambio, como se esperaba, a los rasgos de *Australopithecus*. Las semejanzas de mandíbula y dientes con *Australopithecus* subsisten, pero su significado filogenético debe descartarse; es probable que constituyan ejemplos de evolución paralela o de pervivencia de rasgos del último antepasado común de todos los hominoideos vivientes. Esta es, al menos, mi opinión y la de mi colega Steven Ward, de la Universidad estatal de Kent. Algunos de los hominoideos fósiles del Pakistán, que tienen como mínimo 12 millones de años, muestran rasgos similares. Si nuestra interpretación es correcta, la separación entre hominoideos africanos y asiáticos ocurrió por entonces, o incluso antes. Quizá la división vino a coincidir con la colisión, por deriva continental, de Africa y Asia y la consiguiente mezcla de faunas, hace 16 o 17 millones de años. Yo fecharía la separación en torno a los 16 millones de años antes del presente.

Homínidos primitivos

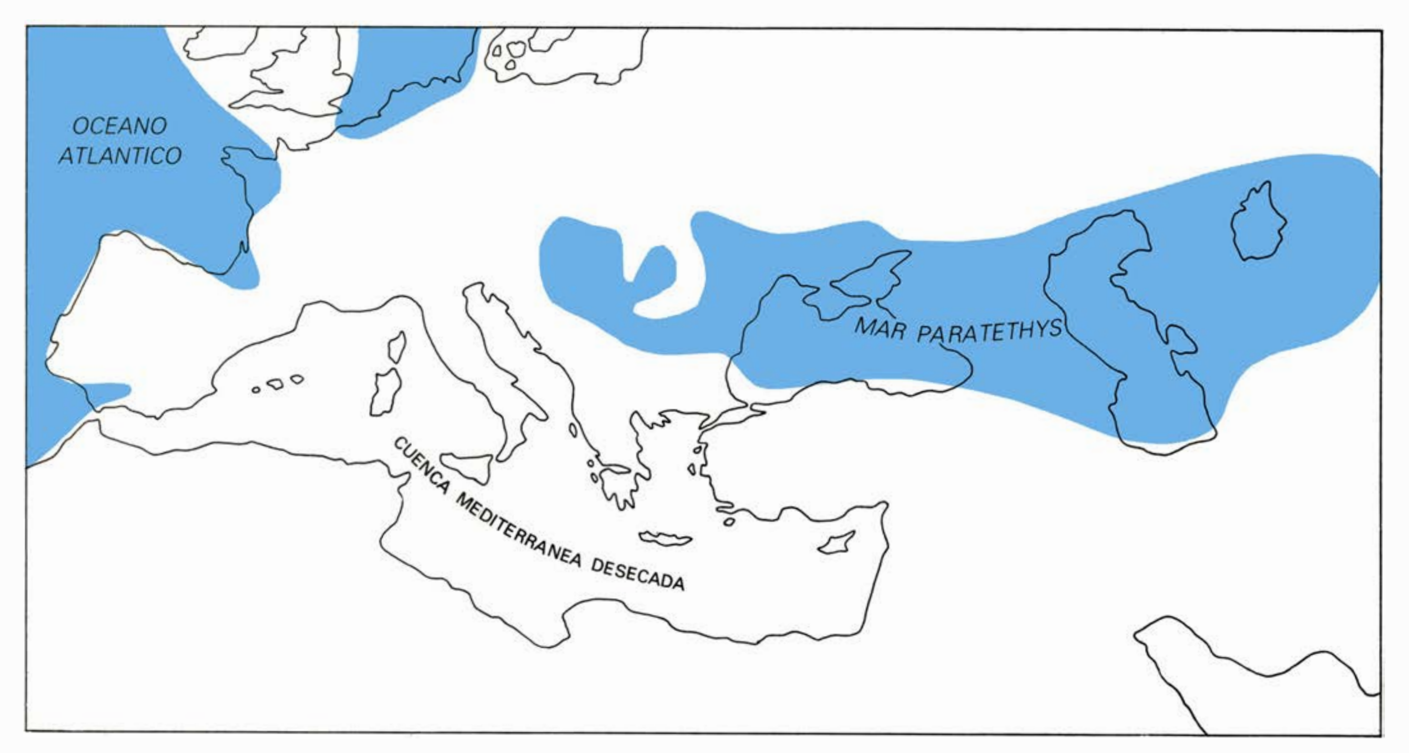
Los primeros homínidos que no admiten dudas de tales surgieron aproximadamente entre los 3,75 y los 4 millones de años en Tanzania y Etiopía. Antes de ese momento, la historia de los homínidos permanece sumida en la oscuridad. Algunos cambios de la fauna y el medio, acaecidos entre los 4,5 y los 7,5 millones de años, reflejan determinados sucesos climáticos y geográficos, el más espectacular de los cuales corresponde a la desecación del Mediterráneo, que se produjo varias veces hace unos 5,5 millones de años. Qué conexión ligó esos acontecimientos con la evolución de los hominoideos africanos es asunto todavía pendiente. Sin embargo, la existencia de huellas de pisada de homínidos que marchaban sobre sus extremidades posteriores, descubiertas por Mary Leakey y sus colegas en Laetoli, Tanzania, está sólidamente datada en 3,75 millones de años. Por otra parte, el esqueleto de Lucy, casi completo en su mitad, y el de otros individuos de *Australopithecus afarensis*, descubiertos por Donald Johanson y sus colegas en Hadar, Etiopía, están fechados, aunque con menor seguridad, entre los 3 y los 4 millones de años. Lucy y los restos asociados de homínidos de Hadar han provocado algún debate taxonómico. ¿Constituyen una nueva y única especie, *Australopithecus afarensis*? ¿Se trata acaso de una subespecie septentrional de *A. africanus*? ¿Dos o más especies? Orillando esas preguntas, daré solamente una interpretación, sin olvidar que la cuestión no está, ni con mucho, resuelta.

A. afarensis es una forma primitiva en muchos de sus caracteres. Los machos adultos probablemente fueran un 50 por ciento más robustos que las hembras. Pesaban de 25 a 50 kilogramos, si no más. El tamaño de su encéfalo era comparable al de un gran antropoide africano, pero, ante la gran variedad de peso de los adultos, no puede decidirse si la relación entre el tamaño del cerebro y el peso del cuerpo era grande o pequeña. En algunos rasgos faciales y del paladar estos homínidos primitivos recordarían a los chimpancés. Pero considerado en conjunto tal como se ha reconstruido, el cráneo guarda parecido mayor con el de una hembra de gorila. *A. afarensis* poseía dientes de gran tamaño y era más robusto que un chimpancé.

La dentición manifiesta unos caracteres plausiblemente primitivos, aunque los caninos de ambos sexos poseían una corona baja y perdieron la disposición saliente, típica de los antropoides. Los molares, bastante gruesos, estaban cubiertos por una capa espesa de esmalte, en probable adaptación para masticar grandes cantidades de frutos, semillas, vainas, raíces y tubérculos, algunos de los cuales quizá fueran bastante duros.

Es imposible demostrar que las pisadas de Tanzania correspondan a homínidos parecidos a los representados por los fósiles de Hadar, pero la forma de las articulaciones de la cadera, rodilla y tobillo de Lucy y sus acompañantes prueba que la población de Hadar era resueltamente bípeda. Los huesos del pie muestran esa misma adaptación al bipedismo, amén de un curioso carácter: los huesos de los dedos y los metatarsianos son largos y curvados. Con respecto a las extremidades del género *Homo*, los brazos de *A. afarensis* eran largos y, las piernas, cortas. Sus manos podían agarrar con fuerza. A juzgar por las proporciones de los huesos de la mano y la forma de sus articulaciones, sus manipulaciones debían ser más precisas que las de los chimpancés actuales.

Los homínidos de Hadar vivieron en zonas de monte alto y sabana, lejos ya



6. DESECACION DEL MEDITERRANEO, en el Mioceno superior, tras haberse separado el Atlántico por el levantamiento montañoso. Debió producir efectos catastróficos en el clima y la ecología de Africa. Sus consecuencias sobre la fauna de mamíferos, hominoideos incluidos, no se han precisado todavía. El episodio sucedió hace unos 5,5 millones de años; alrededor de un millón y medio de años más tarde hicieron su aparición los homínidos.

de los bosques pliocénicos, formando parte de una comunidad de mamíferos que, estructuralmente, era muy parecida a las posteriores comunidades del Pleistoceno. Tales comunidades empezaron a desarrollarse en Africa oriental durante el Mioceno superior; es posible que albergaran homínidos todavía desconocidos por nosotros. Por analogía con los mamíferos actuales es improbable que los homínidos de Hadar fuesen monógamos.

No se han encontrado, asociados a los homínidos de Hadar, guijarros modificados para servir de útiles. Lo que quizá no tenga especial importancia. Supongamos que *A. afarensis* emplease el mismo tipo de útiles que los chimpancés actuales: troncos, ramas, palos y piedras fortuitamente adaptados para la recolección y preparación del alimento y a la exteriorización de su comportamiento. Supongamos, incluso, que lo efectuase con mayor frecuencia que los chimpancés de hoy. Cuatro millones de años más tarde resultaría imposible reconocer tales útiles aunque se hubiesen conservado de manera poco menos que milagrosa.

El uso de útiles de esta clase, si alguna vez llega a confirmarse, podría haber constituido un elemento importante de las conductas que estimularon el desplazamiento bípedo y la reducción de sus caninos. Afirmaciones de este tenor son objeto de acalorados debates. ¿Qué eran los homínidos de Hadar, protocazadores y carnívoros, carroñeros accidentales o pacíficos vegetarianos? ¿Se desarrolló la monogamia junto con el bipedismo? ¿Llevaban los machos la comida a sus parejas a un asentamiento familiar? ¿Compartían los homínidos de Hadar y Laetoli el alimento obtenido, fuese animal o vegetal, o se alimentaba cada cual por su cuenta? Todas estas posibilidades, por no mencionar otras, tienen sus partidarios. De momento, sin embargo, cualquier representación de lo que eran estos primitivos homínidos en su vida y aliento habrá de esperar que se produzca un más amplio acuerdo sobre la naturaleza de sus adaptaciones básicas. Por encima de todo, hemos de resistir la tentación de considerarlos hombres modernos sin otra salvedad que remontados atrás en el tiempo.

La aparición de *Homo*

Hace dos millones y medio de años, dos como mínimo, los homínidos africanos experimentaron una modesta radiación adaptativa. Alrededor de la segunda de esas fechas existían al menos dos especies de homínidos, quizá tres y hasta más, si bien no hay pruebas de ello en ninguna parte de Africa. En la vertiente oriental del continente, una especie de *Australopithecus, A. boisei*, robusta y con dientes muy gruesos, convivía con un homínido de encéfalo desarrollado, cuyo cráneo–tipo fósil figura catalogado en Kenia como E.R.-1470. La especie se conoce hoy más como *Homo habilis*, nombre acuñado en 1964 por L. S. B. Leakey, Philip V. Tobias y John R. Napier, y aplicado a E.R.-1470 por sus descubridores, Richard Leakey y colaboradores. Probablemente existía en Africa oriental, durante la misma época, una tercera especie de homínido, con dentición de pequeño tamaño y encéfalo reducido. Es más, en Africa meridional vivía otra especie de *Australopithecus, A. robustus*, y posiblemente también *H. habilis.* Pero hace alrededor de 1,75 millones de años, *H. habilis* desapareció de Africa, siendo sustituido por un homínido provisto de encéfalo mayor: *Homo erectus*. Lentamente empieza a abrirse paso una idea más clara de la clase de animales allí existentes. La imagen, naturalmente, no puede ser demasiado nítida, y debe evitarse una aproximación detallista, para que no ocurra como en los fotograbados de los periódicos, que acaban resolviéndose en un puntillado sin significado alguno.

Consideremos *A. boisei.* Especie mayor que *A. afarensis* o que la especie de *Australopithecus* de Africa meridional, provista de un encéfalo pequeño, el macho era destacadamente mayor que la hembra. La especie surgió hace más de dos millones de años y sobrevi-

vió, aparentemente con escasos cambios morfológicos, otro millón de años. *A. boisei* pudo haber utilizado bastones para escarbar el suelo o piedras para golpear, pero no existen pruebas de que haya usado instrumentos de modo intensivo.

Aunque *A. boisei* era mayor que otras especies de *Australopithecus*, pudo haberse conducido de manera parecida a éstas. Estudios de la superficie oclusal de los molares de varias especies de *Australopithecus*, llevados a cabo por Alan Walker y Frederick Grine, de la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook, sugieren que todas ellas eran básicamente vegetarianas, como los antropoides; su dieta, que obligaba a una prolongada masticación, era similar. Posiblemente su dieta incluía más raíces y tubérculos y no tantos frutos como la de los antropoides habitantes del bosque.

¿Qué causa determinó la evolución de *A. boisei* y cuál fue el punto de partida de la misma? ¿Debióse a un cambio del clima y el medio? ¿Acaso una modificación en la disponibilidad de ciertas clases de alimento vegetal? ¿Por qué se extinguió después de un millón de años de aparente estabilidad? Ninguna de esas preguntas puede, todavía, contestarse. La recolección de restos fósiles en Africa oriental es, no obstante, intensa y cabe esperar que lo mismo *A. boisei* que sus antepasados y las formas de tránsito entre ellos lleguen a conocerse mejor.

Comprender el tránsito a *Homo habilis* a partir de su antepasado (que podría haber sido también el antepasado de *A. boisei*) es harina de otro costal. Las diversas especies de *Australopithecus* eran criaturas cuyo aspecto resulta difícil de "imaginar" –es decir, de reconstruir tal como vivieron– porque no hay hoy forma que se les asemeje. En todo caso, pueden definirse vagamente como formas de una estirpe particular de antropoides. Más difícil resulta todavía imaginar a *H. habilis*. En varios aspectos debía parecerse a *Australopithecus*, por ejemplo, en su rostro y en su dentición, pero poseía un encéfalo significativamente mayor, con un promedio de 700 centímetros cúbicos de capacidad. No parece evidente la asociación de cráneos de *H. habilis* con los demás huesos de la especie, pero se admite que los de las extremidades que se han atribuido a la misma, a diferencia de los de *Australopithecus*, recuerdan los de las formas posteriores del género *Homo* (excluidos los *H. sapiens* modernos). Se ha sugerido que estas semejanzas reflejan cambios en el modo de locomoción y en las dimensiones de las pelvis femeninas, requeridos por el tamaño del feto.

Por el mismo tiempo en que aparecen en Africa *A. boisei* y *H. habilis* también surgen los primeros yacimientos arqueológicos: se trata de concentraciones de cantos desgastados o retocados, transportados a menudo desde puntos lejanos, junto con restos de animales. La opinión generalizada es que esos yacimientos documentan un cambio de la dieta, que supondría una mayor proporción en alimentos de naturaleza animal; más que *A. boisei* es *H. habilis* quien generalmente está implicado en dicho proceso. Cambio de dieta y aumento del tamaño encefálico están causalmente relacionados. Hasta aquí se está de acuerdo; a partir de ahí, no. ¿Era *H. habilis* un cazador y recolector que transportaba alimentos hasta su hogar para ser compartidos y que practicaba una división del trabajo, en el sentido de que la caza correspondía a los machos y, la recolección, a las hembras? Es decir, ¿era *H. habilis* "moderno" en su comportamiento, o persistía en los hábitos vegetarianos, quizá con adición de algún suplemento alimenticio en la dieta, especialmente a base de carroñas?

El propio registro arqueológico es ambiguo. Una misma dispersión de útiles y huesos puede obedecer a una ocasional necrofagia para consumo individual con escaso o nulo transporte y distribución, o representar la base de un hogar como punto de intensa interacción social. En resumen, la imagen de *H. habilis* sigue siendo borrosa. Habrá que esperar al descubrimiento de más materiales fósiles y de nuevos yacimientos arqueológicos, pero incluso entonces el paso de *Australopithecus* a *Homo* probablemente no se aclare. Ambas criaturas son demasiado diferentes de cualquier otro organismo actual conocido. ¿Qué ocurrió con *H. habilis*? Tan sólo sobrevivió algunos cientos de miles de años, para verse luego sustituido por una especie más duradera, *H. erectus*. ¿Fue *H. habilis* el antepasado de *H. erectus*? Por más que sea esa la creencia generalizada, pudiera ser otra la verdad.

Culminación

Homo erectus constituye la primera especie de homínido que ofrece una amplia distribución. De acuerdo con los datos que tenemos, apareció en Africa, hará quizás un millón seiscientos mil años. Verdad o no, lo cierto es que hace un millón de años la especie

vivía en el sudeste y este de Asia y permaneció en esa área por lo menos hasta hace 300.000 años. Durante ese intervalo de tiempo, superior al millón de años, el registro físico de *H. erectus* nos habla de una prolongada estabilidad morfológica.

H. erectus se parece a las formas poteriores de *Homo* (exceptuando a los *H. sapiens* modernos) por el tamaño corporal y por su robustez. De mayor capacidad craneana que *H. habilis* (más de 800 centímetros cúbicos), poseía incisivos tan desarrollados como los de los homínidos primitivos; el rostro y sus molares eran, empero, de un tamaño más reducido. El registro arqueológico sugiere que algunas poblaciones de *H. erectus* construían gruesos útiles de piedra, simétricamente retocados: bifaces o "hachas de mano". Otras poblaciones de *H. erectus* conocieron el fuego. Algunas, más modernas, dominaban técnicas más elaboradas en la fabricación y retoque de utillaje de piedra, pero la impresión de conjunto es la de una prolongada estabilidad del grupo, tanto en su comportamiento como en su morfología. Arthur Jelinek, de la Universidad de Arizona, ha avanzado que el de "paleocultural" sería un término apropiado para expresar su comportamiento, hasta tal punto difiere de los rápidos cambios con que se manifiesta el comportamiento "cultural" del hombre moderno.

A menudo los paleoantropólogos olvidan inadvertidamente esas diferencias cuando se refieren a la evolución humana anterior al millón y medio de años. El problema de la evolución de hominoideos y homínidos que he presentado hasta aquí afecta a aspectos macroevolutivos: resultados de amplias adaptaciones, tendencias evolutivas y especiación. El conjunto de homínidos formado por *H. erectus*, el *H. sapiens* "arcaico" (incluyendo a los neandertales) y el "moderno" del mismo nombre, representa probablemente una línea continua; los modelos de cambio en el seno de esas estirpes constituyen, por contra, fenómenos de microevolución. Sin embargo, algunos de los más interesantes trabajos paleoantropológicos se refieren al último gran escalón de la evolución humana: el cambio acaecido hace 40.000 o 45.000 años, que determinó el paso de la forma arcaica a la moderna de *H. sapiens*.

Erik Trinkaus, de la Universidad de Nuevo México, ha señalado que los neandertales (y probablemente sus contemporáneos de otras partes del Viejo Mundo) diferían tanto de nosotros, en lo concerniente al comportamiento, cuan diversos eran en su constitución física. Los esqueletos de los neandertales nos aventajaban mucho en robustez; las inserciones musculares en los huesos muestran que eran más fuertes que nosotros. Sus dientes, vigorosos, aparecen fuertemente desgastados, quizás (por analogía con los actuales esquimales) a causa de su aplicación a actividades extraalimentarias (como masticar el pellejo de algunos animales para ablandarlo). El tránsito hacia el moderno *H. sapiens* vino señalado por una pérdida de la robustez del neandertaliano en lo que se refiere a esqueleto, rostro y dentición. Se produjeron, asimismo, cambios en la morfología de las pelvis femeninas. Quizás ello indique que los partos, antes fáciles, resultaran entonces trabajosos, o también que el tiempo de gestación se redujera a los actuales nueve meses, en vez de quizá de 11 (un período que concuerda con las predicciones basadas en la relación general, en mamíferos, entre tamaño del cuerpo de la madre y del feto y duración de la gestación).

Cambios importantes del comportamiento se reflejan asimismo en el registro arqueológico. Implican una proliferación de instrumentos de piedra y hueso más trabajados, cambios en los modelos de caza, en el uso y dominio del fuego, en el empleo del vestido, en los tipos de instalación, en el tamaño de las poblaciones, en el espacio ecológico, en el arte y en otras muestras de actividad ritual. Todo ello señala la emergencia de una especie dotada de capacidades (y potencial) modernos de comportamiento a partir de una forma ancestral que carecía, respecto de las características actuales, de algunos rasgos humanos significativos.

Un breve resumen como éste no puede hacer justicia a la riqueza y complejidad de la información existente en relación a la transición más reciente, aunque microevolutiva. Con todo, resta la mejor documentada y en potencia la más inteligible de todas las transiciones de los últimos 30 millones de años. Como un extraño que trabaja en un intervalo de tiempo que sólo contiene fósiles banales, situado en alguna etapa determinada de 100.000 años de duración, siento terrible envidia de aquéllos que efectúan investigaciones sobre este período más reciente. Contemplando el conjunto en perspectiva, es la guinda de la tarta. Pero no debe olvidarse que se trata tan sólo de la guinda. La tarta, los diversos estadios primitivos de la evolución humana, se nos presenta por ahora de digestión muy dura.

Materia excitónica

Cuando en un semiconductor se combina un electrón de conducción con un "hueco" cargado positivamente se crea un excitón. A su vez, los excitones forman moléculas y líquidos, posibilitando una nueva fase de la materia

André Mysyrowicz y James P. Wolfe

La interacción de la luz con la materia sólida es un fenómeno de decisiva importancia en la exploración de los fundamentos mecanicocuánticos de la materia. El descubrimiento de Albert Einstein de que la energía luminosa se transportaba en forma de paquetes cuantizados de radiación, llamados actualmente fotones, se fundaba en la observación de una de tales interacciones: la fotoemisión de electrones por la materia (efecto fotoeléctrico). Más recientemente se ha demostrado que la distribución de electrones entre los diferentes estados energéticos cuantizados de un sólido se puede modificar, en formas muy diversas, en respuesta a la energía transportada por los fotones incidentes. La comprensión de estos efectos tiene repercusiones enormes desde el punto de vista científico y tecnológico. En particular, las propiedades fotoeléctricas de los cristales semiconductores, que actualmente se producen de forma sintética y con un elevado grado de pureza en la fabricación de componentes electrónicos, se han utilizado en varios dispositivos: detectores luminosos de estado sólido, diodos emisores de luz y células solares. A medida que las interacciones de los fotones con los electrones de un sólido se conocen mejor, se van alcanzando diseños más eficientes para todos estos dispositivos.

Uno de los fenómenos más fascinantes relacionados con el estudio de los sólidos tiene su origen en los hermosos efectos que se producen en la absorción de la luz por parte de un cristal semiconductor. Cuando la luz verde procedente de un láser incide sobre la superficie de un cristal de óxido cuproso (Cu_2O) semiconductor, el cristal produce un destello rojo, una radiación cuya frecuencia es menor que la de la luz incidente. Por ser la energía de un fotón proporcional a su frecuencia, la energía de los fotones verdes incidentes es mayor que la de los fotones rojos emitidos. Este hecho plantea la siguiente pregunta: ¿de qué modo la energía de los fotones verdes se transforma en la energía de los fotones rojos?

Hará unos treinta años se descubrió que la energía de los fotones incidentes podía convertirse, en el interior del cristal, en ciertos entes neutros de vida corta conocidos con el nombre de excitones. En términos simples, podríamos decir que un excitón es un cuanto de excitación electrónica en el cristal que se genera con la absorción de un fotón; la luz roja emitida por el cristal es la energía liberada cuando la excitación electrónica desaparece. Lo que proporciona interés al estado excitado es el hecho de poderse considerar como si fuera una partícula. En cierto modo, los excitones se asemejan a un átomo de hidrógeno: están constituidos por dos portadores de cargas opuestas unidos entre sí por una atracción electrostática. En el átomo de hidrógeno, la carga positiva es un protón; y éste se halla rodeado por un electrón cargado negativamente. En el excitón, la carga positiva tiene una masa mil veces menor que la masa del protón.

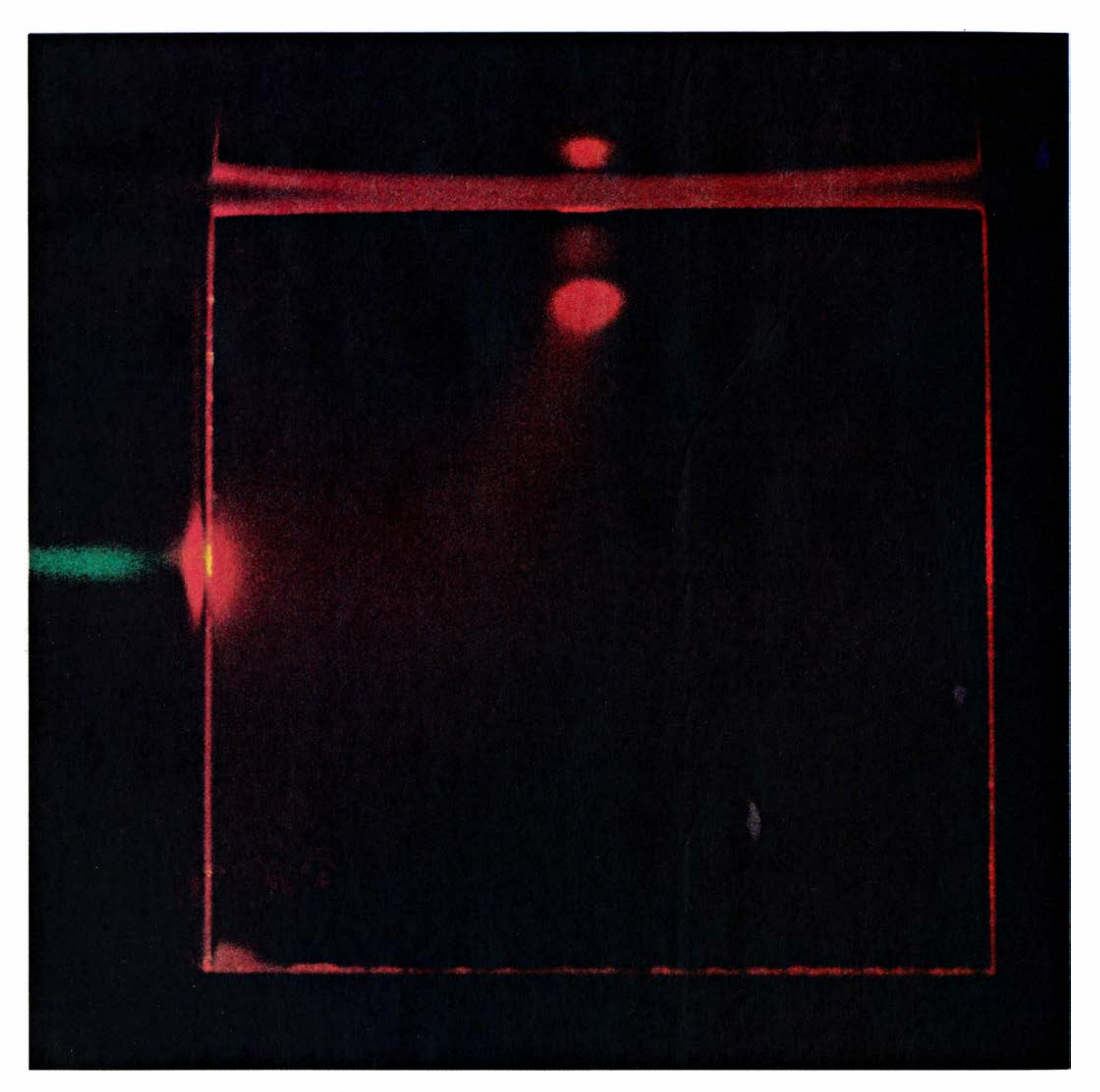
Con el fin de apreciar las implicaciones del descubrimiento de los excitones, vamos a imaginar lo que sucede en el interior de un cristal semiconductor en el que un excitón, extremadamente ligero, desempeña el papel de un átomo de hidrógeno. Esta analogía plantea una serie de cuestiones inmediatas: ¿Pueden los excitones propagarse libremente a través de un cristal, cual si de un átomo de hidrógeno se tratara en el interior de un gas? ¿Pueden combinarse dos o más excitones para formar una molécula? ¿Pueden los átomos o moléculas excitónicos constituir fases sólidas o líquidas? ¿O pueden originarse otras fases más exóticas de la materia excitónica condensada? El estudio de los excitones en el interior de los cristales proporciona las respuestas a estas preguntas.

¿De qué manera la luz produce los excitones en un cristal? Y lo que es aún más importante, ¿por qué un cristal absorbe luz? Para contestar a estos interrogantes, vamos a examinar brevemente los electrones de un cristal, dado que son las partículas que responden a la luz incidente. En lugar de tener valores de la energía bien separados entre sí, como sucede en un átomo aislado, los electrones que forman parte de un cristal ocupan anchas bandas de energías permitidas. Estas bandas están separadas entre sí por intervalos de energía no accesibles a los electrones. Cada banda está constituida por una serie de estados discretos cuyos niveles de energía se hallan tan próximos entre sí que no pueden separarse. El número de estados de una banda es aproximadamente igual al número de átomos del cristal; para un cristal de tamaño macroscópico, dicho número es del orden de 10^{23}. En consecuencia, podemos considerar que las energías de los electrones de una banda se distribuyen en una serie continua de estados.

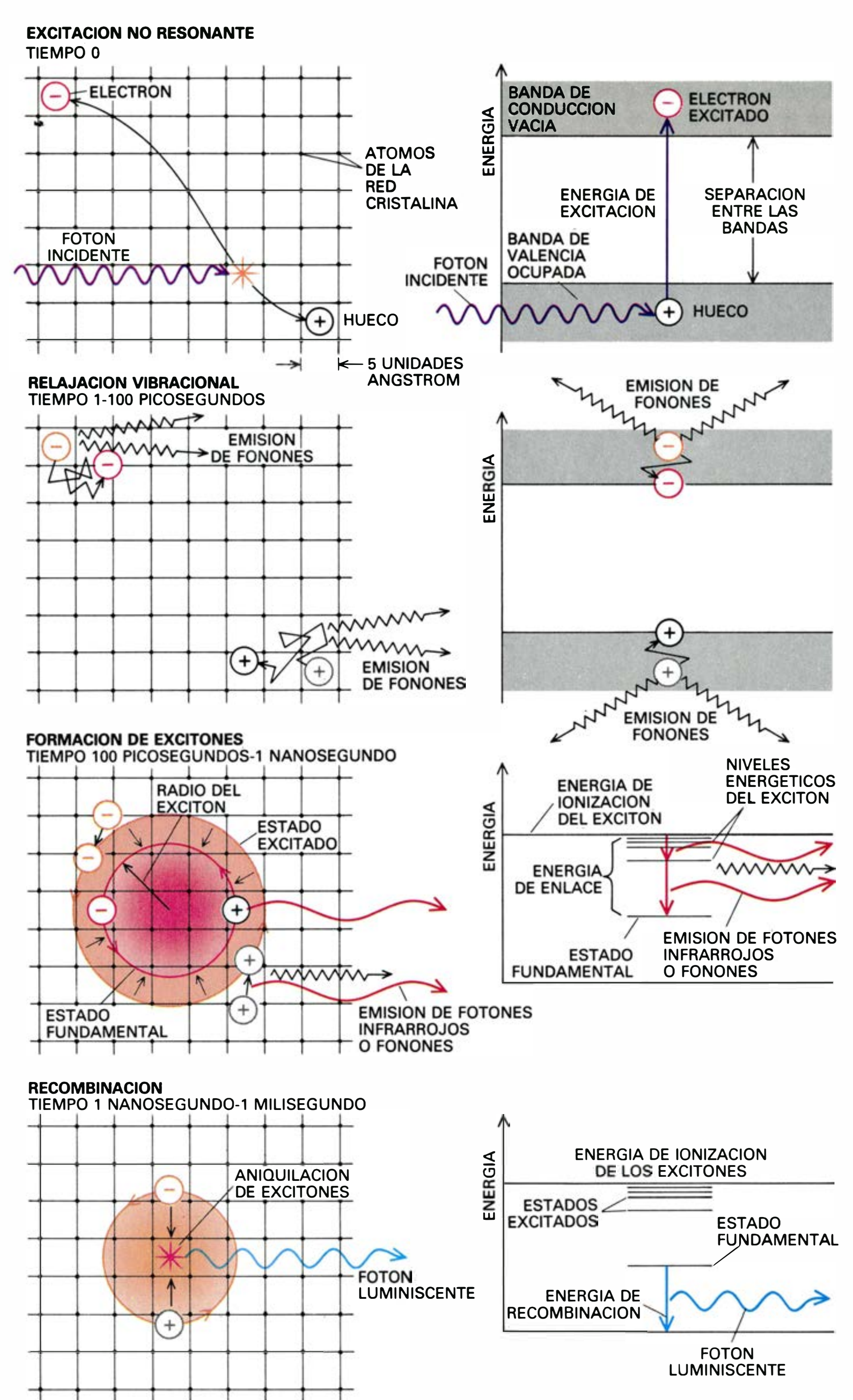
Los electrones llenan los estados permitidos de una banda de energía a partir del extremo inferior de la banda hacia arriba (como el agua llena una botella). La distribución de electrones entre las bandas de energía de un sólido determina si es un metal, un semiconductor o un aislante. En un metal, la banda ocupada de energía más alta sólo está parcialmente llena de electrones. La corriente eléctrica fluye fácilmente a través de un metal, debido a que el cambio de las energías cinéticas de los electrones que se requiere para que se produzca puede originarse como consecuencia de una variación en la distribución de los electrones de la banda parcialmente ocupada. Por otro lado, en un semiconductor o en un aislante a bajas temperaturas la banda ocupada más alta, la llamada banda de valencia, está completamente llena con electro-

nes (como una botella llena hasta el corcho). La siguiente banda de energía, banda de conducción, está vacía a bajas temperaturas; la banda de conducción está separada de la banda de valencia por un intervalo energético "prohibido". No puede existir corriente eléctrica alguna asociada con una banda de estados energéticos electrónicos totalmente ocupada. La separación entre las bandas de valencia y de conducción en un semiconductor es más pequeña que en un aislante y, por tanto, en un semiconductor puro se produce una cierta conductividad eléctrica dado que algunos electrones de valencia están excitados térmicamente y cruzan dicho intervalo. Sin embargo, a bajas temperaturas un semiconductor es altamente aislante.

Cuando un cristal semiconductor absorbe un fotón, promueve a uno de los electrones desde una banda de valencia llena hasta una banda de conducción



1. SE PRODUCE GAS DE EXCITONES al irradiar un cristal sólido de óxido cuproso (Cu_2O) con un haz intenso de luz verde procedente de un láser de argón iónico. Los electrones asociados con los átomos del cristal son excitados por la energía del láser y se mueven libremente por el cristal. Los huecos, regiones de carga positiva neta que aparecen tras la emigración de los electrones, se propagan también libremente, como si se tratara de electrones cargados positivamente. El cristal, que mide 2 milímetros de lado y posee un espesor de 1,5 milímetros, está sumergido en un baño de helio líquido mantenido a una temperatura de dos grados por encima del cero absoluto. A esta temperatura, cada electrón y cada hueco libre pueden formar un estado ligado de corta vida conocido con el nombre de excitón. La luz roja emitida por el cristal pone de manifiesto la presencia de tales excitones; esta luz está producida por la recombinación de los electrones y huecos tras permanecer algunos microsegundos en dicha forma de estado ligado. En la parte superior de la fotografía puede observarse la presencia de una varilla redondeada presionando sobre la superficie del cristal; esto produce una disminución de la energía de los excitones justo bajo la zona sometida a tensión. Los excitones producidos a la izquierda del cristal se desplazan rápidamente hacia la región de baja energía, que aparece en forma de punto rojo brillante debido a que los excitones se acumulan ahí. El punto en cuestión se refleja en la varilla de presión y la imagen reflejada se puede observar justo encima del cristal. (Fotografía obtenida por David P. Trauernicht y los autores en Champaign.)



2. EXCITACION NO RESONANTE. Puede dar lugar a la creación de excitones en un semiconductor cuando la energía de excitación es mayor que la energía de separación entre las bandas, es decir, mayor que la diferencia energética entre los electrones de energía más alta de un cristal semiconductor no excitado y la energía del estado mecánico-cuántico más bajo al que pueden dirigirse dichos electrones. A la izquierda de esta figura se esquematiza el movimiento de las partículas. A la derecha se representan las transiciones de energía asociadas con cada movimiento. El estado inicial de cada una de las etapas de la vida de los excitones se ilustra en color naranja y gris; el estado final va en rojo y negro. Tras la excitación inicial, el electrón libre y el hueco decaen rápidamente hasta una energía igual a la energía de separación entre las bandas emitiendo fonones (cuantos de energía de vibración) hacia el cristal que los rodea. Ambas partículas pueden enlazarse entre sí y dar lugar a un excitón en alguno de los niveles discretos de energía permitidos por la mecánica cuántica. Un excitón formado en un estado excitado puede decaer a un estado de energía inferior antes de que el electrón y el hueco se recombinen. La energía relativa de cada transición viene indicada por un color diferente: las transiciones de baja energía se acompañan por fotones de baja frecuencia, dibujados en rojo, mientras que las transiciones de energía más alta vienen acompañadas por fotones de frecuencia elevada, representados en color azul o violeta. Para mayor claridad, en esta figura se ha exagerado la separación que media entre los diferentes niveles energéticos excitónicos.

vacía. En este proceso, la energía debe conservarse. Tal conservación exige que, para ser absorbida, la energía del fotón sea igual o mayor que la separación existente entre las bandas de valencia y conducción. Si la energía del fotón es inferior a este valor umbral, ningún electrón de valencia podrá absorber al fotón, dado que si lo hiciera pasaría a ocupar dicho intervalo prohibido. En ausencia de otros efectos, todo fotón cuya energía sea menor que la separación energética entre las citadas bandas atravesará el cristal sin atenuación alguna.

Cuando un fotón extrae un electrón de la banda de valencia, se produce un estado vacío (de forma análoga a como se formaría una burbuja al extraer una gota del interior del líquido que llena una botella). Dicho estado vacío, ausencia de un electrón de la banda de valencia, se denomina hueco. Un hueco puede considerarse como una región de carga positiva neta en la red cristalina y, en muchos aspectos, sus propiedades son como las de una partícula ordinaria. Por ejemplo, un electrón situado en una región próxima se puede mover hacia él y neutralizarlo, pero, al hacerlo así, dicha región adquirirá una carga positiva. La región de carga positiva puede propagarse a través de la red cristalina como si se tratara de una partícula real.

Una vez que se han creado en sus respectivas bandas, tanto el electrón como el hueco evolucionan rápidamente hasta alcanzar su estado de mínima energía. El electrón excitado cae hasta el fondo de la banda de conducción, en tanto que el hueco asciende (como lo haría una burbuja en una botella llena de agua) hasta la parte superior de la banda de valencia. El ascenso del hueco obedece a que los electrones restantes de la banda de valencia lo van desplazando a medida que van cayendo hacia los estados disponibles de menor energía. Finalmente, en el tiempo de un nanosegundo (10^{-9} segundos), el electrón y el hueco pueden reducir más su energía total enlazándose para formar un excitón.

Como es bien sabido, el electrón y el protón que constituyen un átomo de hidrógeno pueden poseer uno de los valores de una serie discreta de energías. De forma análoga, para los excitones existe un conjunto de valores energéticos permitidos, valores que corresponden a los diferentes estados excitados del par ligado electrón-hueco. Los niveles energéticos excitónicos convergen hacia un límite superior de energía,

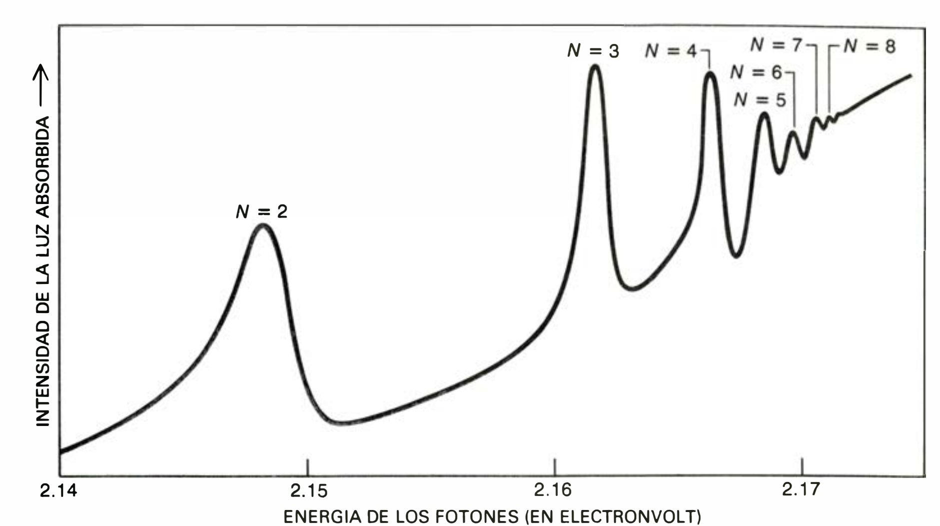
igual a la energía de separación entre las bandas del semiconductor considerado. Sin embargo, la energía de enlace típica de los excitones suele ser de cien a mil veces menor que la energía de enlace del átomo de hidrógeno.

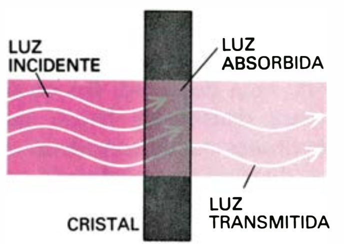
La debilidad de dicho enlace supone que la distancia media entre el electrón y el hueco pueda ser uno o dos órdenes de magnitud mayor que el diámetro del átomo de hidrógeno. De hecho, el tamaño de la órbita de un excitón puede ser de muchos espaciados de la correspondiente red cristalina. Por ejemplo, la energía de enlace de los excitones originados en un cristal de germanio es del orden de 0,0041 electronvolt y su radio es de 130 angstrom (1 angstrom equivale a 10^{-8} cm). A título comparativo, recordaremos que la energía de enlace del átomo de hidrógeno es de 13,6 electronvolt y, su radio, de 0,5 angstrom; el espaciado típico entre los átomos de un cristal es de tres a cinco angstroms. A temperaturas ordinarias, las vibraciones térmicas de la red son lo suficientemente violentas como para romper los débiles enlaces excitónicos. En general, para producir excitones en una cantidad significativa es necesario enfriar el semiconductor hasta temperaturas del orden de algunas decenas de grados por encima del cero absoluto.

¿Cómo pueden detectarse los niveles de energía excitónicos? Uno de los métodos utilizados consiste en medir la cantidad de luz que se transmite a través de un semiconductor para cada color de la luz incidente. En el espectro de la luz transmitida por el cristal se observan una serie de líneas oscuras. Cada una de ellas está producida por la conversión de la luz en excitones en un estado energético diferente. Los fotones que producen las transiciones son absorbidos por el cristal; así, la posición de dichas líneas oscuras en el espectro de la luz transmitida indica el color y, por tanto, la energía de la luz absorbida.

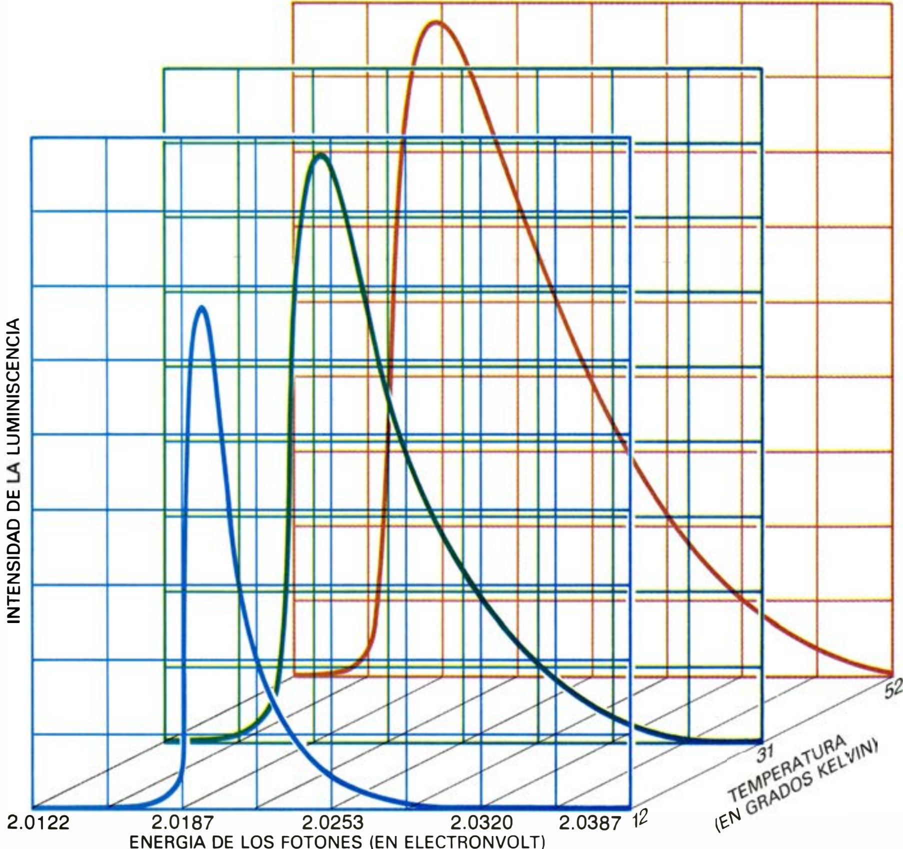
El espectro del óxido cuproso constituye un ejemplo clásico de los espectros de absorción que proporcionan la estructura energética de los excitones. En dicho espectro se observan ocho líneas de absorción excitónica diferentes que constituyen una serie convergente similar a las líneas espectrales del hidrógeno monoatómico. El análisis de este espectro indica que la energía de enlace de los excitones en el óxido cuproso es de 0,14 electronvolt, lo cual corresponde a un radio del excitón del orden de 10 angstrom.

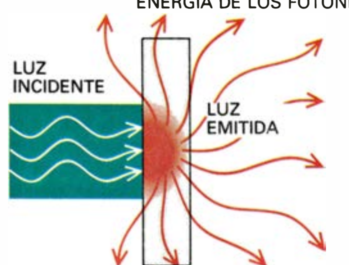
Otro método para extraer informa-





3. EXCITACION RESONANTE DE LOS EXCITONES, producida por la absorción de un fotón cuya energía corresponde exactamente a uno de los niveles energéticos excitónicos. En esta figura se representa el espectro de absorción del óxido cuproso cristalino. Los máximos del espectro, designados por los números *N*, corresponden a los niveles energéticos de los excitones producidos en el cristal por la energía de los fotones de la luz incidente. Evgenii F. Gross, adscrito a la Universidad de Leningrado, y Serge Nikitine, de la Universidad de Estrasburgo, fueron pioneros en el diseño de experimentos de este tipo.





4. ESPECTRO DE LUMINISCENCIA emitido cuando los excitones se recombinan a partir de su estado fundamental en el óxido cuproso. Permite conocer la distribución de energías cinéticas de los excitones justo antes de su recombinación. La energía de recombinación es igual a la suma de la energía del estado fundamental más la energía cinética del excitón. La anchura del espectro disminuye a medida que lo hace la temperatura del cristal, lo que demuestra que la anchura de la distribución de energías cinéticas también se reduce. Los datos reproducidos aquí fueron obtenidos, en la Universidad de París, por Danièle Hulin, André Antonetti y André Mysyrowicz.

ción sobre los excitones se basa en detectar la luz que emiten. Una vez formado, el excitón no subsiste indefinidamente. Evidentemente, el electrón puede caer dentro del hueco, con la consiguiente emisión de un fotón y la desaparición del excitón. Este proceso se conoce con el nombre de recombinación. La probabilidad de que tenga lugar una recombinación varía bastante de un cristal a otro, dependiendo de los pormenores de la banda de valencia y de la banda de conducción. En los cristales puros, la vida media de los excitones varía entre los nanosegundos y los milisegundos.

Analizando el epectro de los fotones luminiscentes emitidos en el proceso de recombinación, se sabrá la distribución energética de un conjunto de excitones. Supongamos, por ejemplo, que un cristal de óxido cuproso se ilumina con luz verde, de energía superior a la energía del intervalo entre bandas de dicho cristal. Recuérdese que, en estas circunstancias, dicho cristal emite una luz roja característica. La emisión está producida por la recombinación de excitones en el estado fundamental, es decir, el estado excitónico de energía más baja. Sin embargo, la luz emitida no posee una frecuencia única, sino que abarca toda una serie de frecuencias con una anchura que aumenta al elevar la temperatura del cristal. El intervalo de frecuencias emitidas se corresponde con el intervalo de energías de los excitones presentes en el cristal en el instante en que se produce la recombinación.

Puesto que la energía total de los excitones viene determinada por la energía de separación entre las bandas, por la energía de enlace y por la energía cinética asociada con el movimiento del centro de masas del excitón, el valor de las frecuencias de emisión proporciona información acerca de la distribución de energías cinéticas y, por consiguiente, de las velocidades de los excitones.

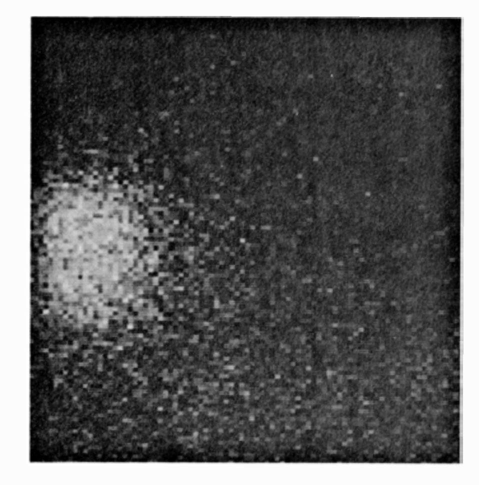
El espectro de luminiscencia del óxido cuproso demuestra, inequívocamente, que los excitones están en movimiento en el interior del cristal. La distribución de velocidades de los excitones concuerda con la distribución de velocidades de los átomos ordinarios en un gas de baja densidad. En otras palabras, para densidades bajas, un grupo de excitones puede considerarse como un gas de partículas confinado en el interior de un sólido.

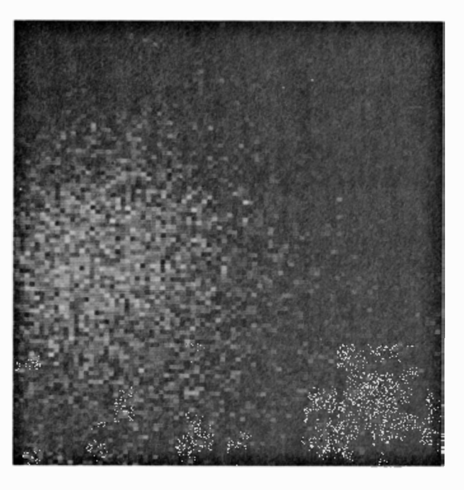
Con el fin de estudiar el movimiento de un gas de excitones vamos a referirnos primero a un gas que pueda verse (imaginemos el vapor que sale por el pitón de una cafetera a punto de hervir). El vapor se difunde en el aire que rodea al pitón; al cabo de un tiempo, se disipa. De forma análoga, los excitones creados en la superficie de un cristal por los fotones se mueven hacia el interior del cristal y acaban recombinándose. Los excitones en movimiento, por ser neutros, no transportan carga eléctrica; sí transportan en cambio energía; ésta se libera cuando el electrón y el hueco se recombinan. Vale la pena señalar que los excitones se han observado también en la materia viva. El movimiento de excitones en la materia viva puede ser un mecanismo importante para el transporte de energía en ciertas reacciones fotoquímicas, como la fotosíntesis.

¿Cómo es, a escala microscópica, el movimiento de un gas de excitones? El análisis del correspondiente espectro de luminiscencia pone de manifiesto que los excitones de un cristal están en equilibrio térmico con los átomos que lo constituyen. Para alcanzar dicho equilibrio, los excitones deben ser capaces de intercambiar su energía cinética con la de vibración de la red cristalina. En otras palabras, cada excitón debe ser dispersado al azar por los átomos en vibración térmica, realizando un movimiento browniano. Puede demostrarse que la distancia radial media recorrida por una de tales partículas durante un tiempo t es proporcional a la raíz cuadrada de t; en consecuencia, la sección transversal media de una nube de gas expansionándose a partir de un punto central es proporcional al tiempo de difusión t, transcurrido desde el instante inicial. La correspondiente constante de proporcionalidad se conoce con el nombre de constante de difusión.

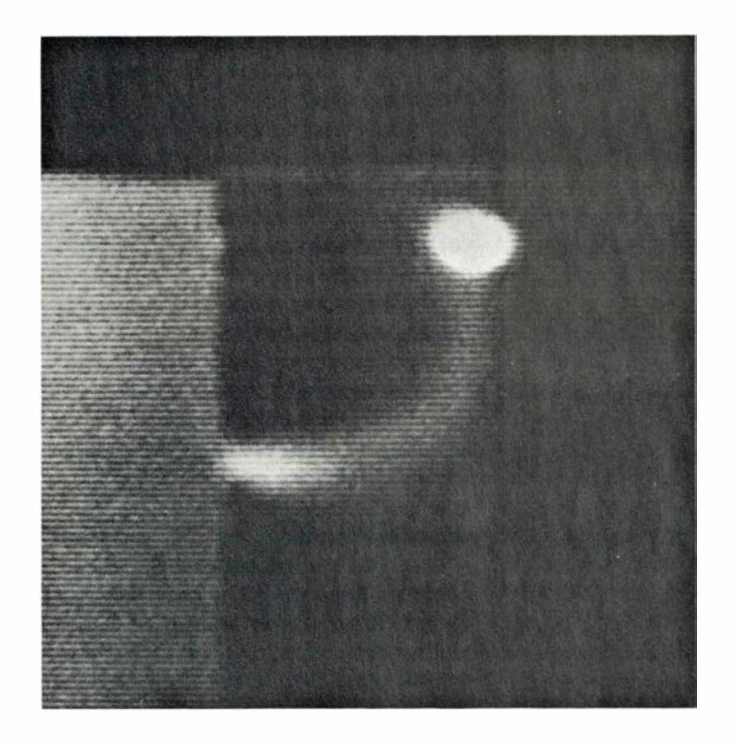
¿Cómo se mide la constante de difusión para un gas de excitones? La idea experimental consiste en crear los excitones en un punto de la superficie de un cristal con un pulso de luz de láser de, pongamos por caso, 100 nanosegundos de duración. A partir de ese momento se obtiene una serie de sucesivas "instantáneas" de la luminiscencia de los excitones a tiempos determinados. La velocidad de obturación que se requiere para tomar tales instantáneas es unas diez mil veces mayor que la velocidad más rápida de una cámara fotográfica ordinaria; la cantidad de luz emitida por los excitones durante ese tiempo es minúscula. En consecuencia, para obtener tales instantáneas es necesario detectar los distintos fotones luminiscentes con la ayuda de un tubo fotomultiplicador.

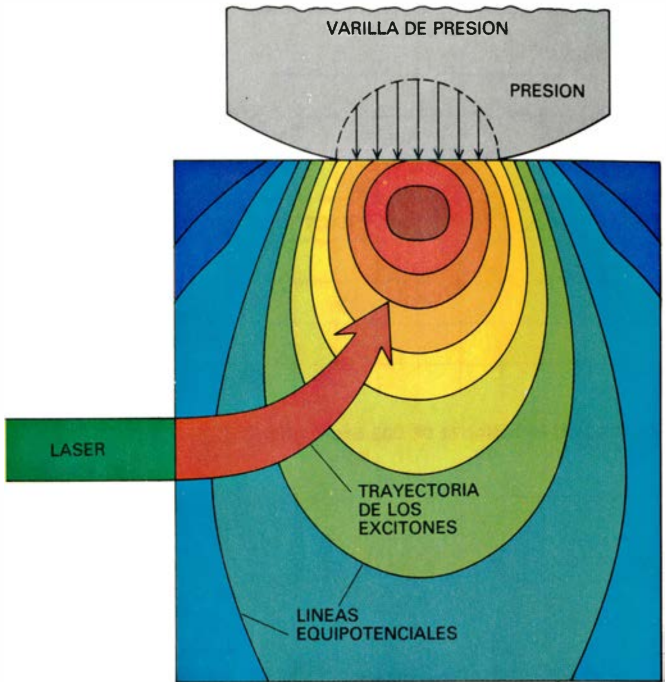
Los impulsos de los fotones son seleccionados electrónicamente a intervalos de 100 nanosegundos centrados en tiempos diferentes, tras la producción de cada pulso del láser. El procedimiento se repite aproximadamente un





5. DIFUSION DE LOS EXCITONES formados cerca de la superficie de un cristal de óxido cuproso, representada aquí en dos etapas. A medida que el gas de excitones se expande en el interior del cristal, algunos excitones se recombinan y originan una luminiscencia característica. La intensidad de la luminiscencia se midió con la ayuda de un fotomultiplicador para cada uno de los elementos que constituyen estas dos imágenes. En la figura de la izquierda se representa la expansión tras haber transcurrido 200 nanosegundos (mil millonésimas de segundo) desde el instante en que se produjo la correspondiente excitación al hacer llegar un haz de láser sobre la cara izquierda del cristal. En la figura de la derecha, la expansión corresponde a un tiempo de 600 nanosegundos. La constante de difusión, que mide la velocidad con que el gas de excitones se expande en el interior del cristal, puede determinarse a partir de estas imágenes; debido al pequeño valor de la masa de los excitones, la constante de difusión de los excitones es mayor que la de cualquier gas atómico o molecular. Estas fotografías fueron obtenidas por Trauernicht.





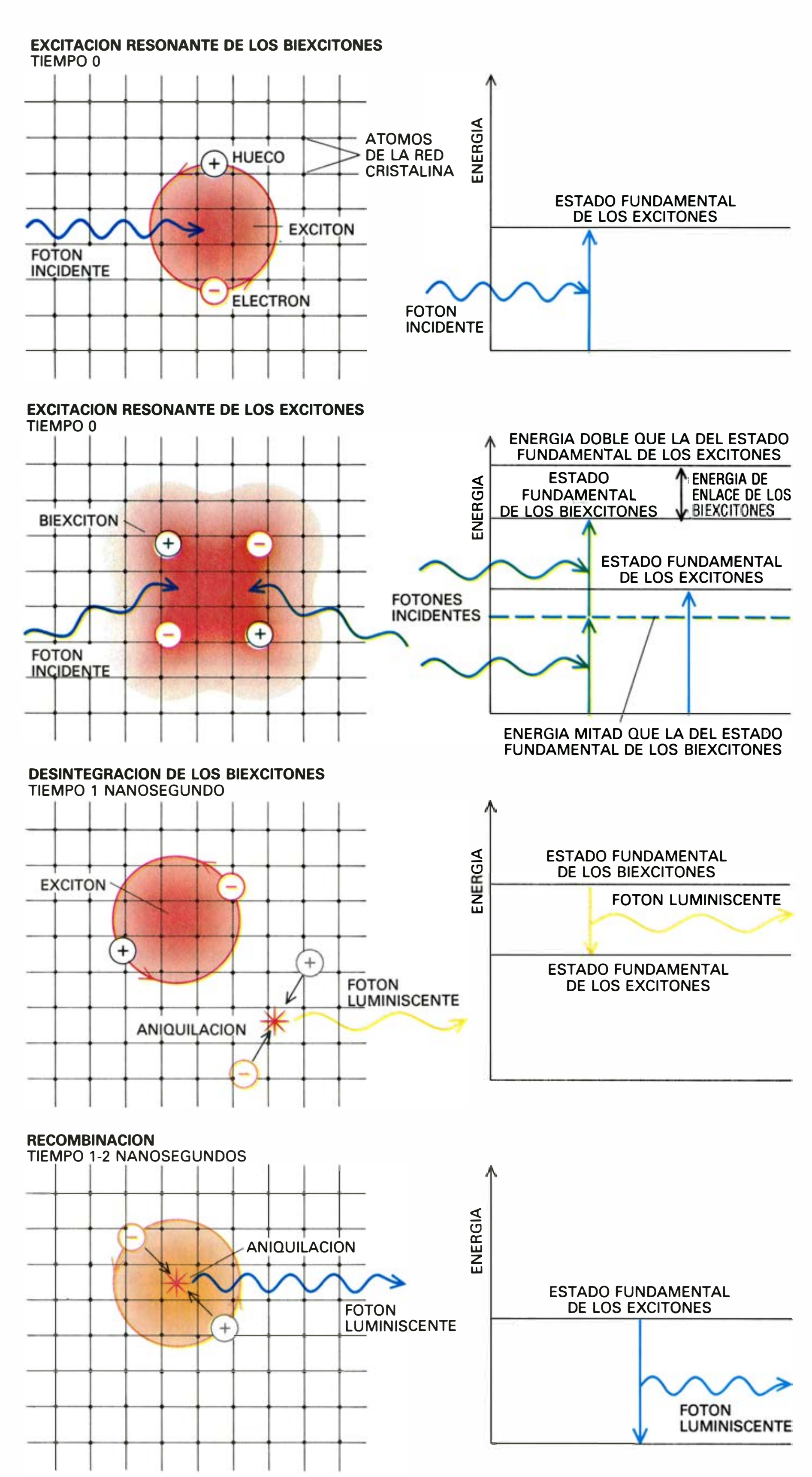
6. VARIACION DE LA ENERGIA de los excitones, de una región a otra de un cristal, aplicando una presión sobre su superficie con el extremo redondeado de una varilla. El gradiente de energía resultante, el cambio de la energía de los excitones en el cristal por unidad de longitud, es una fuerza que tiende a dirigir a los excitones hacia regiones donde la energía es menor. En la fotografía de la izquierda, obtenida por Paul L. Gourley y uno de los autores (Wolfe), la citada varilla presiona el centro de la cara superior de un cristal de silicio. El pozo de potencial, región donde la energía potencial de los excitones es mínima, está situado exactamente bajo el punto donde se aplica dicha presión, como ocurría en el caso del óxido cuproso. La luminiscencia originada por el flujo de excitones se sitúa en la región del infrarrojo, por lo que fue registrada por una cámara de televisión sensible al infrarrojo, para ser convertida en una imagen visible sobre la pantalla de un tubo de rayos catódicos. La frecuencia de recombinación de los excitones disminuye a media que se desplazan hacia las regiones de energía más baja. En el diagrama de la derecha se han representado las curvas equipotenciales calculadas por Robert S. Markiewicz. Las regiones donde la energía potencial de los excitones del cristal de la fotografía disminuye se representan en violeta, azul, verde, naranja y rojo. Estos colores manifiestan la disminución de la frecuencia de la radiación infrarroja originada por la recombinación de pares de electrones y huecos.

millón de veces; cada pulso de láser crea una nueva nube de excitones, que se difunde y decae antes de que se produzca otro. El número de fotones emitidos desde una pequeña región del cristal para cada pulso de láser se registra en un ordenador; de esta forma, se obtiene una imagen completa de la luminiscencia producida en las diferentes zonas del cristal, construida zona a zona.

La imagen resultante de la luminiscencia de los excitones para un determinado intervalo de tiempo, contado a partir de la producción del pulso de láser, puede reproducirse sobre la pantalla de un monitor de televisión. Cuando la sección transversal de la región brillante de luminiscencia se representa en función del tiempo, se ve que dicha superficie aumenta en proporción directa al tiempo transcurrido desde la producción del citado pulso. Esta relación demuestra que los excitones se difunden como si fueran átomos de un gas a baja presión. Sin embargo, la constante de difusión para un gas de excitones es mucho mayor que la de un gas atómico ordinario. Por ejemplo, en el caso del óxido cuproso, el valor de la constante de difusión es de 1000 centímetros cuadrados por segundo a una temperatura de 1,2 grados Kelvin (grados Celsius por encima del cero absoluto), mientras que para las moléculas de nitrógeno del aire a temperatura ambiente dicho valor es de unos 0,2 centímetros cuadrados por segundo. La difusión extremadamente rápida de los excitones es consecuencia de su pequeña masa y de la hasta cierto punto baja frecuencia de dispersión por otras partículas a bajas temperaturas.

Otro método para caracterizar el movimiento de los excitones se basa en medir su movilidad. Cuando se aplica una fuerza a un excitón, la segunda ley de Newton exige que el excitón se acelere a través del cristal de forma inversamente proporcional a su masa inercial efectiva. Sin embargo, las colisiones entre dicho excitón y los átomos de la red en vibración térmica producen un cambio constante en la dirección de su movimiento. En consecuencia, el excitón inicia de nuevo su aceleración cada vez que es dispersado. Para un campo de fuerzas dado, puede demostrarse que el excitón alcanza una cierta velocidad media de deriva en la dirección de dicho campo, de magnitud proporcional a la intensidad del mismo. La movilidad de una partícula sometida a repetidas colisiones se define por el cociente entre la velocidad de deriva de la partícula y la fuerza aplicada sobre ella. La movilidad se mide generalmente para una partícula cargada, un electrón sometido a un campo eléctrico por ejemplo; la fuerza sobre dicha partícula se mide en volt por centímetro. De aquí que la movilidad se exprese, generalmente, en centímetros cuadrados por volt y por segundo.

Para determinar la movilidad de los excitones debe medirse su velocidad bajo cierta fuerza aplicada. Evidentemente, tal fuerza no puede estar originada por un campo eléctrico, dado que los excitones son neutros. El truco consiste en aplicar una tensión externa sobre el cristal semiconductor. La tensión reduce la energía del intervalo entre bandas del cristal y, en consecuencia, disminuye la energía de los excitones. Si un cristal se somete a una tensión que varía de forma gradual a lo largo de él, la energía de los excitones disminuirá cuando éstos se trasladen desde una región de tensión baja a otra de tensión alta. El gradiente de ener-



7. SE GENERAN BIEXCITONES, o moléculas excitónicas, cuando dos haces de láser de la misma frecuencia inciden sobre una lámina cristalina delgada. Por separado, cada uno de estos atravesaría dicho cristal sin apenas atenuación alguna, pero la interacción entre haces y cristal puede producir su absorción para una frecuencia igual a la suma de las frecuencias de ambos haces. La absorción se produce cuando se ajusta la frecuencia de cada haz de forma tal que corresponda a la mitad de la energía total del biexcitón. El biexcitón es un estado ligado de dos electrones y dos huecos. Se produce porque su energía es menor que la de dos excitones libres. Se desintegra cuando uno de los pares electrón-hueco se recombina y el segundo par forma un excitón ordinario; este segundo par se recombina poco después. Los diagramas obedecen a las mismas convenciones arbitrarias que rigieron los que se reproducen en la figura 2.

gía, o cambio en la energía de los excitones por unidad de longitud, es la fuerza que actúa sobre ellos.

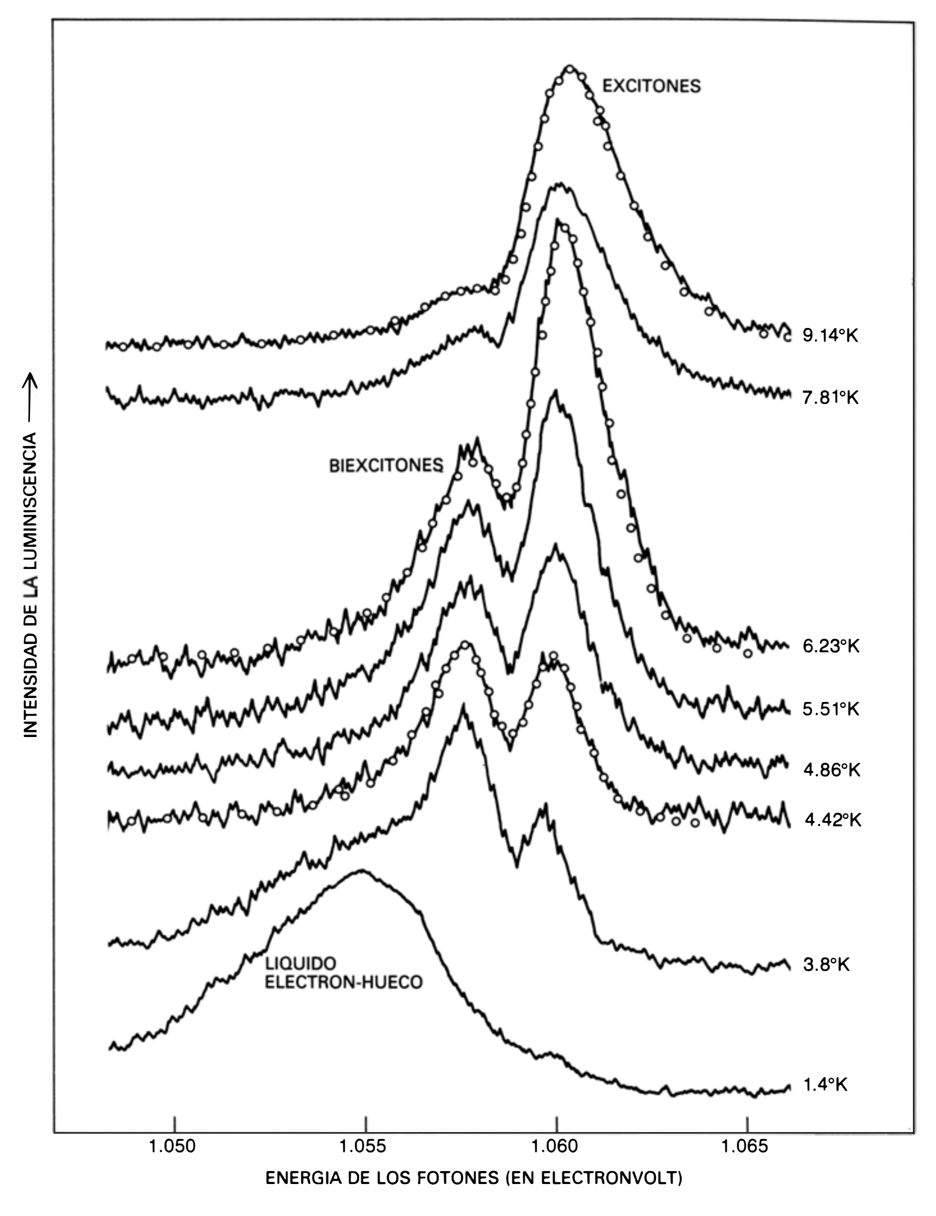
Los gradientes de energía originados por tensiones se han utilizado para medir la movilidad de los excitones de silicio, germanio y óxido cuproso. Los correspondientes cristales se presionan en el centro de una de sus caras pulimentadas mediante el extremo redondeado de una varilla. La tensión del material es máxima en un punto del interior del cristal situado algunas décimas de milímetro bajo el punto de contacto de la varilla con el cristal. Los excitones originados por un destello luminoso en la superficie adyacente del cristal se mueven hacia esta región de tensión elevada, recombinándose algunos de ellos en su camino hacia esa región. La fuerza que actúa sobre un excitón puede determinarse representando el desplazamiento de la frecuencia de la luz emitida por los excitones en función de su posición a lo largo del cristal. El desplazamiento espectral por unidad de longitud está originado por el cambio en la energía de separación entre bandas y, por consiguiente, dicha relación proporciona el valor de la fuerza aplicada al excitón.

La fotografía de la figura 6, que representa un cristal de silicio, ofrece un ejemplo notable del movimiento de los excitones. Dicho cristal se enfrió a una temperatura del orden de 10 grados Kelvin; se excitó a continuación mediante un rayo láser continuo. Una cámara de televisión sensible a la radiación infrarroja registró la luminiscencia de los excitones a una longitud de onda de 1,2 micrometros, que equivale a una energía de los fotones cercana a la mitad de la que corresponde a la luz amarilla. El recorrido de los excitones se puede observar gracias a que el gradiente de tensión existente (es decir, la variación de la tensión por unidad de longitud) puede llegar a ser bastante grande en el caso del silicio. Para obtener esta fotografía se aplicó una fuerza de unos 100 kilogramos sobre una superficie de cristal de silicio de un milímetro cuadrado de área; dicha presión hubiera producido el aplastamiento de otros muchos cristales semiconductores capaces de originar excitones, el óxido cuproso entre ellos.

La velocidad de deriva de los excitones puede determinarse utilizando un haz de láser pulsante y observando la posición del máximo de la distribución de excitones para tiempos diferentes, a medida que dichos excitones avanzan en el interior del cristal. Las velocida-

des de deriva de los excitones en el seno de cristales de pureza elevada, a temperaturas de 1,5 grados Kelvin, varían entre 100 y 1000 metros por segundo; por tanto, las correspondientes movilidades resultan ser del orden de 10^6 a 10^7 centímetros cuadrados por volt y por segundo. A título comparativo, la velocidad con que se mueven los electrones que constituyen una corriente eléctrica de un ampère en un hilo de cobre de 1 milímetro de diámetro es menor que 0,1 milímetros por segundo. En otras palabras, si los electrones existentes en dicho hilo se movieran a la misma velocidad con que lo hacen los excitones en un cristal, la intensidad de la corriente en el hilo sería del orden de diez millones de ampère. A temperatura ambiente, la movilidad de los electrones en el conductor en cuestión es de unos 40 centímetros cuadrados por volt y por segundo, es decir, unos cinco órdenes de magnitud menor que la movilidad de los excitones.

En todos los semiconductores estudiados hasta ahora, la movilidad de los excitones en un cristal aumenta considerablemente al disminuir la temperatura. Tal relación entre movilidad y temperatura proporciona una confirmación adicional del hecho de que los excitones son dispersados por la red cristalina: a medida que disminuye la temperatura del cristal, se reduce la amplitud de las vibraciones de la red y, por tanto, el intervalo de tiempo entre dos colisiones sucesivas aumenta. La medida del avance de los excitones puede proporcionar una información microscópica muy valiosa acerca de su movimiento. Por ejemplo, los excitones del óxido cuproso a una temperatura de 1,5 grados Kelvin recorren unos 30 micrometros entre dos dispersiones sucesivas, lo cual representa una distancia enorme a escala atómica. Resulta evidente que los excitones son partículas extremadamente móviles.



8. FASES BIEXITONICAS GASEOSA Y LIQUIDA, constituidas por electrones y huecos, puestas de manifiesto a partir del espectro de luminiscencia de la materia excitónica confinada en un pozo de potencial de un cristal de silicio. El pozo de potencial es la región de baja energía que se produce como consecuencia de la aplicación de una tensión sobre el cristal (véase la figura 6). Para la temperatura más elevada a la que se representa dicho espectro hay un predominio de excitones en el pozo de potencial. Cuando la temperatura disminuye, se observa un máximo de luminiscencia originado por los biexcitones, desplazado respecto a la energía de los excitones en una cuantía igual a la energía de enlace del biexcitón. A temperaturas muy bajas aparece un pico muy ancho; la existencia de este máximo pone de manifiesto la condensación de los excitones y biexcitones en una fase líquida. Los círculos representan los valores teóricos de la intensidad. Los datos experimentales fueron obtenidos por Paul Gourley y J. P. Wolfe.

¿Cómo reaccionan los excitones en presencia de otros excitones? La probabilidad de que se produzcan interacciones entre los excitones aumenta con la potencia del haz incidente, dado que con ella se produce un aumento de la densidad del gas de excitones. Una vez más, conviene recurrir a la analogía existente entre los excitones y los átomos de hidrógeno. Aun cuando el átomo de hidrógeno no posee carga eléctrica, los átomos de un gas poseen una fuerte tendencia a combinarse para formar hidrógeno molecular (H_2). Cada átomo se comporta como un dipolo eléctrico, y los dipolos eléctricos se atraen entre sí de forma análoga a como lo hacen los dipolos magnéticos. En virtud de esta atracción, la energía de una molécula de hidrógeno es menor que la de los dos átomos separados.

La energía de dos excitones se reduce cuando forman una molécula excitónica, o biexcitón. Dado que un biexcitón está constituido por cuatro partículas de masa parecida, en un principio se dijo que dichas moléculas serían poco estables. Sin embargo, los biexcitones se han detectado en cristales tales como el silicio, el germanio, el cloruro de cobre, el bromuro de plata y el sulfuro de cadmio.

Uno de los métodos utilizados más corrientemente en la creación de biexcitones consiste en producir excitones en cantidades suficientes para favorecer su unión. La existencia de biexcitones se pone a menudo de manifiesto a través de la presencia de una nueva línea de luminiscencia. La energía de los fotones que dan lugar a esa nueva línea es menor que la asociada con la recombinación de un excitón individual. Concretamente, la línea en cuestión puede originarse cuando se produ-

ce la recombinación de uno de los pares electrón-hueco de un biexcitón dejando un excitón libre. Por otro lado, en el silicio y en el germanio, la intensidad de la nueva línea de luminiscencia aumenta con el cuadrado de la intensidad de la luminiscencia del excitón. Este aumento es precisamente el esperado para los biexcitones, dado que la probabilidad de crear un biexcitón aumenta con el cuadrado de la densidad de excitones.

Aun cuando los biexcitones se suelen formar simplemente aumentando la densidad de excitones, también pueden producirse por medio de una excitación óptica directa. Este método requiere, por ejemplo, la absorción simultánea de dos fotones, cada uno con una energía exactamente igual a la mitad de la energía del biexcitón. Dado que un biexcitón está constituido por dos pares electrón-hueco enlazados entre sí, la energía total de los dos fotones debe ser igual a la energía de dos excitones libres menos la energía de enlace del biexcitón [*véase la figura 7*]. Cuando esta condición de resonancia se realiza ajustando la frecuencia del láser, se observa una línea de absorción muy intensa. Se trata de una línea bastante especial: aparece sólo cuando la intensidad de la luz incidente es elevada. En un cristal de cloruro de cobre, con un espesor de un micrometro, se necesita un rayo de láser con una potencia de un megawatt para producir la absorción de un 10 por ciento de fotones. En comparación con otros procesos de absorción de dos fotones en un sólido, este efecto óptico es bastante intenso.

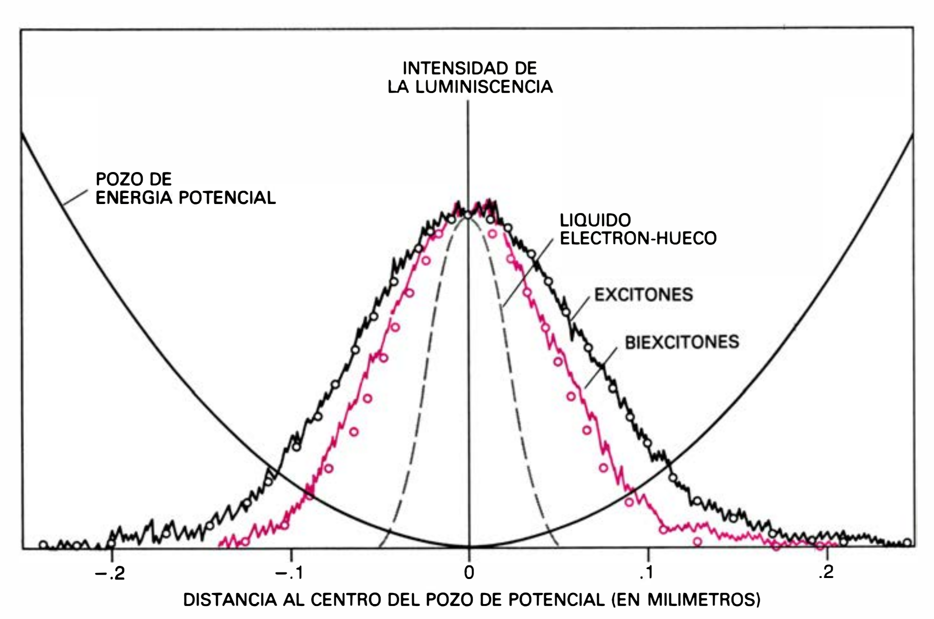
Podemos preguntarnos ahora si existen otras fases de materia excitónica, es decir, si existe algo parecido a la forma líquida o sólida del hidrógeno molecular que se producen a bajas temperaturas. Hasta ahora no se ha observado ninguna clase de fase líquida ni sólida de materia excitónica. Sí se ha descubierto en ciertos cristales la existencia de una nueva fase, no contemplada en el caso del hidrógeno. Cuando la temperatura de dichos cristales se reduce unos pocos grados por encima del cero absoluto, se produce la emisión de un intervalo amplio de frecuencias luminiscentes; ni la recombinación de excitones ni la de biexcitones pueden dar cuenta de esta serie de frecuencias ni de la frecuencia correspondiente a la luz más intensa de dicho espectro. Por otro lado, se ha visto que la densidad de las partículas que producen esta emisión es mucho mayor que la de un gas de excitones.

Una forma elegante de demostrar experimentalmente la existencia del aumento de densidad se basa en un método similar al utilizado en la medida del avance de los excitones. Recuérdese que, cuando un cristal se somete a una presión con el extremo redondeado de una varilla, se crea una región de máxima tensión en el interior del cristal. Un efecto parecido lo conocen bien los diseñadores de rodamientos de bolas: cuando una bola sufre tensiones muy elevadas, se rompe siempre de dentro a fuera, debido a que las tensiones más altas se localizan en el interior de la misma. Dado que la energía de separación entre bandas disminuye cuando la tensión aumenta, se forma en el cristal un "pozo de potencial", una región de energía potencial mínima para los excitones. Este pozo de potencial captura la materia excitónica y la mantiene confinada. En el curso de unas experiencias con silicio se ha visto que la aparición del nuevo máximo de luminiscencia emitido por el pozo de potencial se presenta acompañado de una disminución muy pronunciada del volumen de la región de emisión. En otras palabras, la densidad de las partículas confinadas en el pozo de potencial aumenta.

¿Por qué las energías de las partículas de la fase condensada se distribuyen en un intervalo tan amplio? Para comprender este fenómeno es necesario estudiar con mayor detenimiento las propiedades estadísticas de los excitones. A un nivel fundamental, todas las partículas de la naturaleza pueden clasificarse en dos grandes grupos de acuerdo con su espín. El espín de una partícula es como el momento cinético de una esfera, excepto en el hecho de que, en mecánica cuántica, el espín sólo puede poseer valores discretos. Las partículas de espín entero reciben el nombre de bosones; fermiones, aquellas cuyo espín es semientero.

Tanto el espín del electrón como el del hueco valen 1/2; ambas partículas serán, pues, fermiones. Un excitón, constituido por dos partículas cuyo espín vale 1/2, posee espín entero; luego es un bosón. A densidades elevadas, las propiedades mecánico-cuánticas de un conjunto de fermiones difieren bastante de las que caracterizan a un conjunto de bosones. De acuerdo con el principio de exclusión, formulado por Wolfgang Pauli, un determinado estado mecánico-cuántico puede ser ocupado simultáneamente por un sólo fermión. Por otro lado, no existe límite alguno al número de bosones que pueden ocupar un estado dado.

La distinción entre fermiones y bosones reviste particular importancia a bajas temperaturas, cuando las partículas tienden a ocupar los estados ener-



9. VOLUMEN DE LA REGION EMISORA DE LUZ del pozo de potencial asociado con cada uno de los máximos de los espectros de luminiscencia representados en la figura 8; confirma la existencia del gas de biexcitones y del líquido electrón-hueco. Estos gráficos demuestran que la emisión de luminiscencia excitónica procede del volumen mayor. Dado que la masa del biexcitón es el doble de la masa del excitón, se predice que la luminiscencia originada en la desintegración de los biexcitones (*círculos coloreados*) se debería emitir por parte de una región cuyo diámetro fuera igual a $\sqrt{2}/2$, unas 0,7 veces el diámetro de la región asociada con la desintegración de los excitones (*círculos negros*). Estos gráficos demuestran que los datos experimentales coinciden con la predicción teórica. El volumen de la región que emite la luminiscencia característica del líquido electrón-hueco es aún menor (*curva de trazos*), señalando la condensación de un gas a una fase líquida más densa. Los datos experimentales fueron obtenidos por Gourley y Wolfe.

PARTICULAS DISTINGUIBLES (IMAGEN SEMICLASICA)	PARTICULAS INDISTINGUIBLES (IMAGEN MECANICO-CUANTICA)
	BOSONES
	FERMIONES

10. INDISTINGUIBILIDAD de las partículas elementales: da cuenta de la diferencia existente entre las distribuciones mecánico-cuánticas y no mecánico-cuánticas (semiclásicas) de un conjunto de partículas en los estados de energía disponibles. En una distribución semiclásica, cada partícula ocupa un estado entre varios de energía diferente; ahora bien, al poder diferenciarse, esas partículas pueden distribuirse en los distintos estados energéticos de más formas a como lo hacen en las distribuciones cuánticas. Por ejemplo, si dos partículas distinguibles pueden alojarse en uno cualquiera de un conjunto de tres estados, hay nueve formas diferentes de ocupación. Si sólo se puede alojar una partícula en cada estado, habrá seis formas de ocupación (*izquierda*). En las distribuciones cuánticas, todas las partículas de un tipo determinado son indistinguibles. En el caso de los bosones, que pueden ocupar el mismo estado energético, tres de cada seis disposiciones posibles de las partículas están constituidas por estados ocupados de forma múltiple, es decir, una proporción mayor que tres de cada nueve (*arriba, derecha*). A bajas temperaturas, para las que el número de partículas es comparable al número de estados energéticos disponibles, esta propiedad de la distribución cuántica de los bosones confina una proporción mayor de partículas en los estados de menor energía que la proporción predicha por la distribución semiclásica. En el caso de los fermiones, dos de los cuales no pueden ocupar un mismo estado energético, hay tres formas de alojar las partículas en los tres estados energéticos, en vez de las seis previstas por la distribución semiclásica (*abajo, derecha*).

géticos disponibles más bajos. Al descender la temperatura, los fermiones llenan los estados de energía más baja sin que exista ocupación múltiple. De aquí que, incluso para el cero absoluto, un conjunto de fermiones ocupa un amplio intervalo de energías; la energía del estado ocupado más alto depende de la densidad de los fermiones.

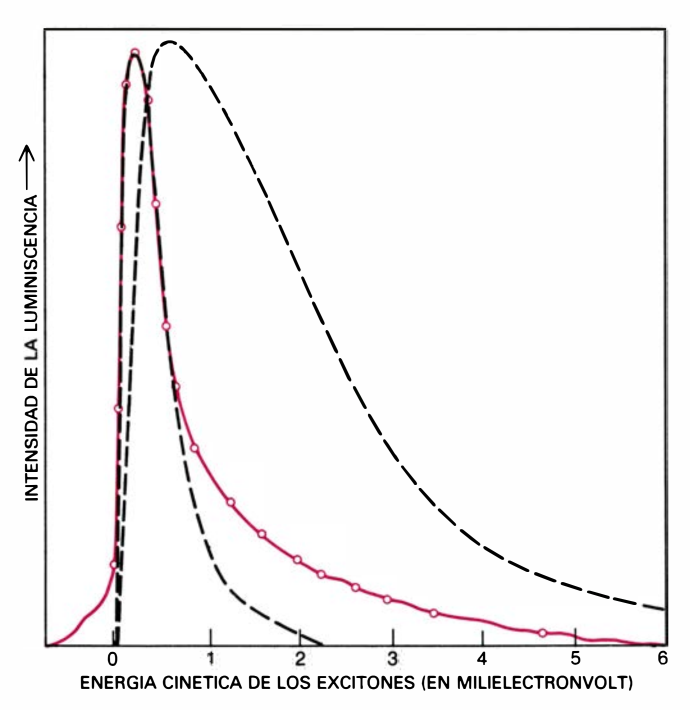
Esta propiedad fermiónica de electrones y huecos es responsable del amplio intervalo que caracteriza a la luminiscencia del silicio a bajas temperaturas. La anchura del intervalo espectral se reduce muy poco al disminuir la temperatura. Este hecho pone de manifiesto que los excitones se han disociado en electrones y huecos y estas partículas llenan los estados disponibles de acuerdo con el principio de exclusión. Midiendo la anchura del intervalo espectral se puede conocer la densidad de las partículas en la fase condensada; para los electrones y huecos confinados en el fondo de un pozo de potencial en el silicio, dicha densidad es de 3×10^{17} partículas por centímetro cúbico, es decir, un millón de veces menor que la densidad atómica del cristal. A este fluido de fermiones se le conoce como líquido electrón-hueco. En el caso del germanio, se ha podido observar y estudiar una gota de este líquido electrón-hueco, cuyo diámetro era del orden de un milímetro. Dado que el líquido está constituido por portadores de carga libres, su conductividad eléctrica es comparable con la de un conductor de cobre.

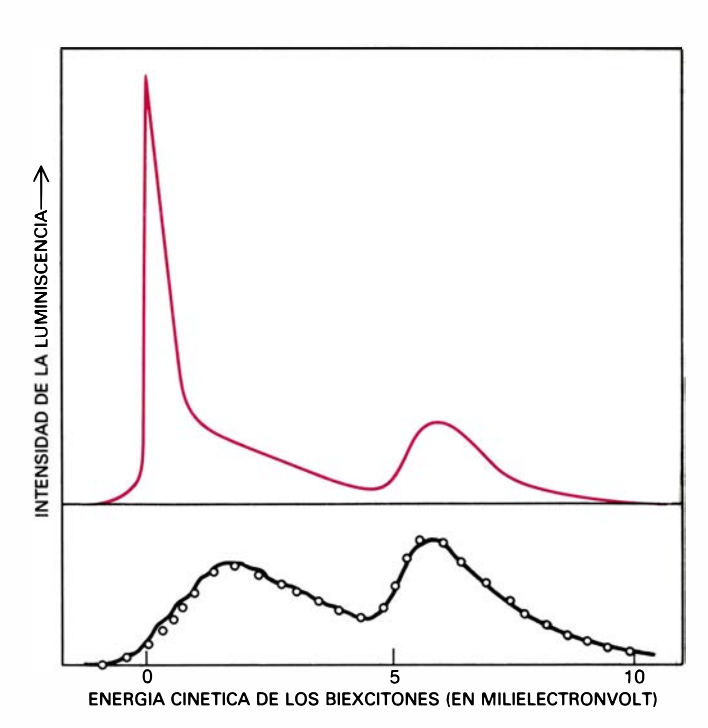
En cristales no sometidos a una tensión externa, el tamaño de las gotas del líquido electrón-hueco es mucho menor. En el germanio, dicho tamaño se ha determinado midiendo la dispersión de un haz de láser infrarrojo. El tamaño en cuestión resulta ser de unos cinco micrometros, lo que implica la existencia de unos cien millones de pares electrón-hueco en cada gota. Estas gotas suelen formar una nube en torno al punto de excitación en la superficie del cristal y en el interior del gas de excitones.

La nube de gotas se parece a una niebla de partículas líquidas, si bien no permanece en reposo. Las gotitas se van agrupando de forma análoga a como sucede con las gotas de agua de la atmósfera; la tensión superficial de estas gotas es débil, pero no nula: alrededor de un millón de veces menor que la tensión superficial del agua. Además, dichas gotas pueden moverse a lo largo del cristal empujadas por un "viento" de fonones, que son los cuantos de energía de vibración de la red atómica. Un viento no uniforme de fonones se propaga a través del cristal a partir del punto excitado por el láser, empujando la nube de gotas electrón-hueco en unas direcciones con preferencia a otras. El estudio de las interacciones de los fonones con las gotitas ha permitido comprender mejor el fenómeno de la propagación de fonones a bajas temperaturas.

No todos los excitones existentes en los semiconductores pueden condensarse en líquidos electrón-hueco. Por ejemplo, se prevé que los excitones del óxido cuproso permanecerán en fase gaseosa incluso para densidades elevadas; no se han observado nunca ni biexcitones ni líquido electrón-hueco. En el caso del cloruro de cobre, pueden formarse biexcitones, pero no se ha detectado el líquido. Si los excitones de estos cristales permanecen siempre en fase gaseosa, la anchura del espectro que se produce como consecuencia de la recombinación de excitones disminuirá a medida que descienda la temperatura, debido a que los excitones son bosones y éstos tienden a llenar los estados de energía más baja. De hecho, si la concentración de un gas de bosones supera un cierto valor crítico, dependiente de la temperatura y de la masa del bosón, se prevé que todas las partículas que se añadan al gas condensen en un estado de energía mínima, prácticamente sin movimiento. Este efecto se basa en una teoría formulada, en 1924, por el físico hindú S. N. Bose para los fotones sin masa y generalizada posteriormente por Einstein para partículas con masa. Tal efecto se conoce actualmente como condensación de Bose-Einstein.

Todavía no es posible afirmar, sin reservas, que la condensación de Bose-Einstein ha sido ya observada. Muchos científicos creen que dicha condensación puede dar cuenta de la brusca disminución de la viscosidad y de otras propiedades peculiares de un superfluido, es decir, del estado que toma el helio líquido cuando alcanza temperaturas próximas al cero absoluto. Sin embargo, debido a la existencia de fuertes interacciones entre las partículas de un líquido, resulta difícil des-





11. LA CONDENSACION DE BOSE-EINSTEIN puede dar cuenta de la forma anómala de los dos espectros de luminiscencia reproducidos en esta figura. La condensación se predice a partir de la distribución mecánico-cuántica de los excitones y biexcitones, clasificados ambos como bosones, entre los estados energéticos disponibles para ellos a bajas temperaturas. A la izquierda se representa el espectro de luminiscencia de un gas denso de excitones en el óxido cuproso. La distribución de velocidades de las partículas que puede deducirse de este espectro (*en color*) coincide perfectamente con la distribución predicha por la estadística de Bose-Einstein (*círculos blancos*). Las distribuciones semiclásicas representadas para dos temperaturas posibles diferentes (*en negro*) ajusta ciertas regiones del espectro observado, pero el ajuste general no es tan bueno como el obtenido en el marco de la estadística de Bose-Einstein. Estos datos fueron recopilados por Hulin, Claude Benoît à la Guillaume y Mysyrowicz, en París. A la derecha, se reproduce el espectro de luminiscencia de un gas de biexcitones en cloruro de cobre (CuCl). La curva en negro representa el espectro obtenido a partir de un gas de excitones a presión relativamente baja originado por un láser de baja potencia; este espectro concuerda bien con la distribución de velocidades de los biexcitones calculada a partir de una distribución semiclásica (*círculos blancos*). La curva coloreada corresponde al espectro obtenido con un láser de mayor potencia; este espectro pone de manifiesto un gran aumento en la luminiscencia de biexcitones a baja energía. El máximo espectral es muy pronunciado señalando que todos los biexcitones tienen aproximadamente la misma energía cinética. Este es el tipo de espectro predicho para una condensación de Bose-Einstein. Los datos experimentales fueron recopilados en la Universidad de Indiana por Lloyd L. Chase, Nasser Peyghambarian, Gilbert Grynberg y Mysyrowicz.

cribir teóricamente cómo se produce la condensación de Bose-Einstein en el helio-4, el isótopo del helio que se convierte en superfluido a una temperatura de 2,17 grados Kelvin. Muchos investigadores han tratado de observar este efecto en un gas diluido, para el cual la aplicación del modelo teórico es mucho más sencilla.

El condensado de Bose-Einstein, si realmente existe, representa un estado de la materia completamente nuevo y, por consiguiente, sus propiedades pueden ser muy peculiares. Por ejemplo, difiere bastante de los estados de la materia condensados espacialmente, a saber, la fase sólida y líquida. En realidad, el término condensación se refiere únicamente a la agregación de los bosones en los estados de más baja energía. El comportamiento de las partículas es coherente sobre distancias macroscópicas, de forma análoga a como sucede con los movimientos de los pares de electrones que transportan una corriente eléctrica sin resistencia alguna en un metal superconductor.

Para una densidad dada de un gas, la temperatura crítica de la condensación de Bose-Einstein aumenta a medida que la masa de la partícula disminuye. La temperatura crítica del hidrógeno atómico, el elemento más ligero del sistema periódico, es ligeramente inferior a 0,1 grados Kelvin para una densidad gaseosa del orden de 10^{19} átomos por centímetro cúbico. Para tal densidad, la condensación de Bose-Einstein suele quedar excluida, dado que los átomos de hidrógeno se combinan fácilmente para producir moléculas diatómicas. No obstante, se están realizando esfuerzos prometedores para obtener un gas de hidrógeno atómico de alta densidad mediante un método que consiste en alinear los espines de los átomos magnéticamente. Casi todos los otros elementos solidifican antes de alcanzar las condiciones extremas de temperatura y densidad necesarias para que se produzca la condensación de Bose-Einstein. Sin embargo, debido a la pequeña masa del excitón, cabe esperar que la condensación de Bose-Einstein de un gas de excitones, cuya densidad es de 10^{19} partículas por centímetro cúbico, se produzca a unos 100 grados Kelvin, es decir, a una temperatura mucho mayor que la esperada para cualquier sistema atómico.

Existen ya varias fuentes de pruebas que apoyan la condensación de Bose-Einstein de un gas de excitones o de biexcitones. Si se aumenta gradualmente la densidad de excitones del óxido cuproso a dos grados Kelvin, el espectro de luminiscencia empieza a discrepar del espectro teóricamente predicho para una distribución clásica de las velocidades de las partículas. En contraste, la distribución de velocidades obtenida al suponer que los excitones se encuentran en el umbral de la condensación de Bose-Einstein se ajusta bastante bien a los datos experimentales. Investigadores de la Unión Soviética han encontrado también que el intervalo de energías de los fotones emitidos en la recombinación de excitones en el germanio se hace menor a medida que la densidad de excitones aumenta. Este descubrimiento concuerda con las predicciones del comportamiento de un gas de bosones en las proximidades del umbral de la condensación de Bose-Einstein.

Finalmente, para densidades elevadas, el espectro de luminiscencia del gas de biexcitones del cloruro de cobre presenta algunas anomalías. Los biexcitones se crean directamente en un estado de baja energía por excitación luminosa resonante. Para temperaturas por debajo de 30 grados Kelvin y densidades por encima de 10^{18} partículas por centímetro cúbico, aparece en el espectro una línea de recombinación bien definida; la existencia de esta línea pone de manifiesto que la mayoría de los biexcitones se desintegran a partir de un estado de baja energía. Cuando a este sistema se le añaden biexcitones mediante una excitación no resonante, tales biexcitones se alojan en el estado ocupado de más baja energía. Por otra parte, si en el sistema en cuestión no existen previamente biexcitones resonantes, los biexcitones incorporados adquieren una distribución de velocidades no mecánico-cuántica.

Aunque este resultado sugiere claramente la existencia de un condensado de Bose-Einstein en dicho cristal, todavía se podría argüir que tales efectos se observan por la exclusiva razón de que la excitación resonante inicial fuerza a que todos los biexcitones ocupen el mismo estado de baja energía. Lo que nos gustaría observar, y todavía no se ha conseguido, es la condensación de Bose-Einstein en un gas inicialmente en equilibrio térmico. Sin embargo, no sería sorprendente que el primer sistema físico en que se pusiera de manifiesto dicha condensación fuera un gas de excitones.

El estudio de las interacciones de excitones explora los dominios de las escalas de temperatura, presión, intensidad luminosa y tiempo que están situadas generalmente en los límites de la experimentación. Por otra parte, los excitones se observan en una amplia gama de materiales: además de los semiconductores y sistemas biológicos, ya mencionados, se encuentran en ciertos aislantes y cristales orgánicos, así como en algunas estructuras periódicas fabricadas artificialmente y conocidas con el nombre de superestructuras de estado sólido. Algunos instrumentos puestos a punto recientemente, tales como un láser capaz de producir pulsos de una duración del orden de la fracción de picosegundo, nos permitirán estudiar la dinámica de los excitones con una resolución temporal todavía mejor. Es casi seguro que en tales dominios se producirá el descubrimiento de nuevos fenómenos.

Sonidos musculares

La contracción muscular genera sonidos, que no percibimos porque el oído humano es insensible a las bajas frecuencias. Son ahora objeto de estudio ante su posible utilidad en ciencia y medicina

Gerald Oster

En vigilia, nuestros músculos se contraen y relajan continuamente. Por extraño que parezca, a la vez producen sonidos. Está justificado cierto escepticismo ante tal afirmación, pues, en condiciones normales, esos sonidos nos resultan inaudibles: sin embargo, si colocamos los pulgares con suavidad en los oídos y cerramos las manos, percibiremos un ruido sordo. El sonido se produce al cerrar el puño, y lo genera la contracción de los músculos del antebrazo.

No solemos captar los sonidos musculares porque el oído humano es insensible a las bajas frecuencias sonoras. La frecuencia media del sonido muscular es de 25 hertz (ciclos por segundo), próxima al umbral de audición. Aunque se conoce la existencia de esos sonidos desde hace siglos, ni fisiólogos ni médicos les han prestado atención. Sin embargo, los últimos avances en el campo de los ordenadores y del instrumental médico han facilitado su investigación detallada. Los resultados de tales estudios ofrecen gran interés. La aplicación que yo mismo he hecho de los nuevos métodos sugiere que el sonido se genera por la contracción de las fibras musculares. Bien pudiera ser que esos efectos nos rindieran un conocimiento mejor de la fisiología muscular, de las patologías musculares (cardiacas incluidas) y hasta de ciertos tipos de comunicación animal.

Fue un jesuita italiano, Francesco Maria Grimaldi, quien describió por primera vez el sonido muscular que se transmite al oído a través de los pulgares, en su libro *Physicomatheis de lumine*, tratado sobre la luz que se publicó en 1663, dos años después de su muerte. Grimaldi, famoso por su descubrimiento de la difracción de la luz, se interesó también por los sonidos; atribuyó el ruido sordo de los músculos al "apresurado movimiento del humor animal". Desde Galeno, médico griego del siglo II, se creía que los movimientos voluntarios los gobernaba un fluido –los espíritus animales– que emanaba del cerebro. Tras la muerte de Grimaldi, el tema de los sonidos musculares cayó en el olvido durante siglo y medio.

La cuestión interesó de nuevo al físico, químico y médico británico William Hyde Wollaston. En 1810, en las Conferencias Croonian ante la Royal Society de Londres, Wollaston comparó el sonido de la demostración de Grimaldi con el producido por los carruajes al rodar de madrugada por las adoquinadas calles londinenses. Llevando la comparación a extremos sorprendentemente literales, Wollaston logró determinar la frecuencia del sonido muscular, para lo que hizo conducir su carruaje a través de las calles a distintas velocidades, hasta que el ruido igualó al sonido sordo que oía con sus pulgares. Cuando el carruaje iba a unos 13 kilómetros por hora, se producía un sonido muy semejante al que generaban los músculos del antebrazo.

El diseño regular de las calles de Londres ayudó considerablemente a Wollaston. En 1810, las losas de las calles londinenses eran uniformes: todas medían 15,5 centímetros. Puesto que 13 kilómetros por hora corresponden a 361 centímetros por segundo, las ruedas del carruaje pasaban por encima del algo más de 23 losas cada segundo. Wollaston concluyó que la frecuencia aproximada del sonido muscular era de 23 hertz.

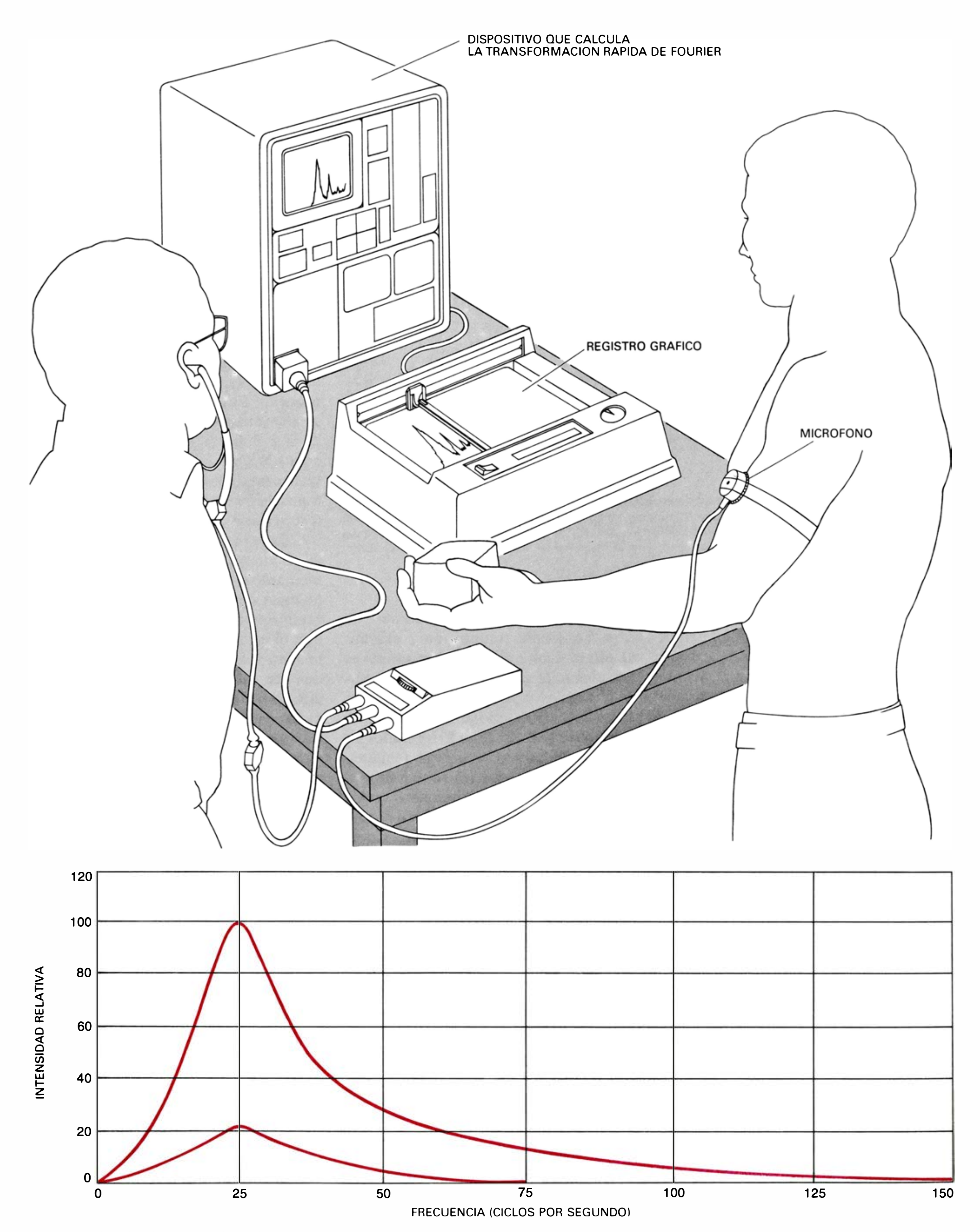
Valiéndose de un rudimentario estetoscopio (un bastón de madera unido a una pequeña almohadilla sobre la que aplicaba la oreja), Wollaston realizó otras dos observaciones. En primer lugar, comprobó que todos los músculos emitían el mismo ruido, independientemente de su tamaño. Y vio que el sonido no cambiaba en razón de la fuerza ejercida, a menos que ésta fuera muy grande; el sonido parecía entonces ligeramente más agudo.

Se volvió a archivar el tema otros 150 años largos, salvo esporádicas alusiones en publicaciones científicas cuando se decía que esos sonidos interferían la escucha de otros sonidos del cuerpo humano. Mi interés por ellos despertó en el curso de una investigación de malformaciones cardiacas congénitas en ratas cuyas progenitoras se habían expuesto a ciertos agentes químicos durante el embarazo. Para captar los sonidos del corazón de las ratas nos valíamos de un estetoscopio electrónico, que amplificaba los sonidos de baja frecuencia. Inyectábamos un sedante a los animales para facilitar su manipulación, pese a lo cual contraían ocasionalmente las patas. Cada vez que las movían se distinguía un sonido de baja frecuencia a través de los auriculares del estetoscopio electrónico.

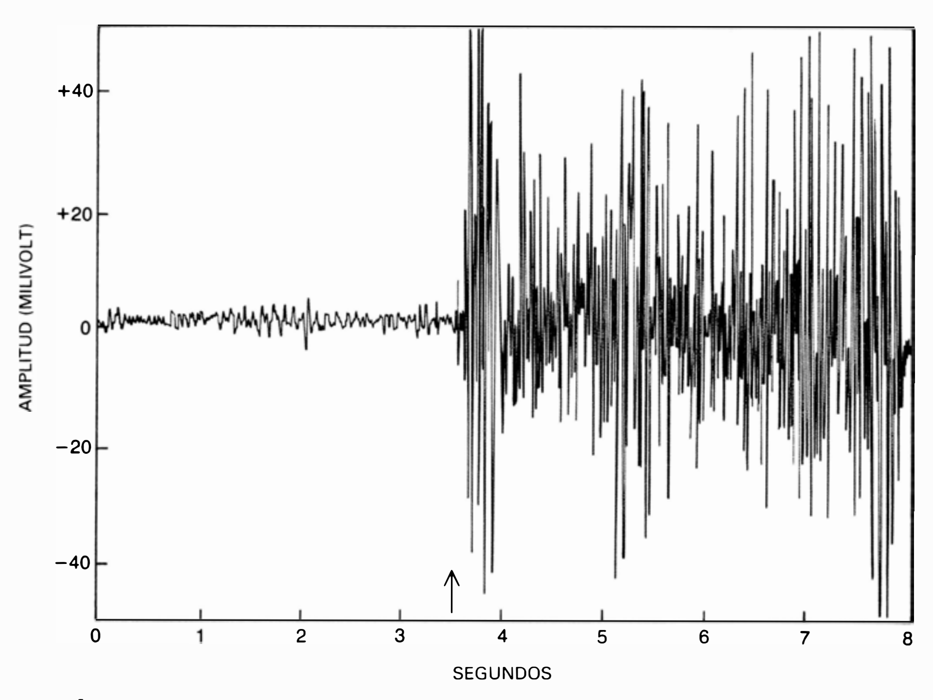
Tenía yo el convencimiento de que el tema de los sonidos musculares era algo conocido, pero al revisar la bibliografía científica y médica constaté que había sido poco estudiado, por lo que decidí trabajar sobre ello empleando instrumental moderno. Joshua S. Jaffe, a la sazón estudiante de la Facultad de Medicina Mount Sinai de Nueva York, se unió a mi empeño.

No sorprende la poca atención que han prestado los médicos al tema de los sonidos musculares, pues con el estetoscopio mecánico, el instrumental más usado para auscultar los sonidos del cuerpo humano, no se perciben; sólo se detectan sonidos de frecuencias comprendidas entre los 75 y los 200 hertz, los rumores cardiacos o pulmonares, por ejemplo. En razón de su diseño, filtra los sonidos de menos de 50 hertz.

Es más, los escasos sonidos de baja frecuencia que puedan captarse resultan inaudibles por el oído humano, insensible a esos tonos. Por ejemplo, la sensibilidad de una persona a un tono de 25 hertz es 10.000 veces inferior a su sensibilidad a un tono de 250 hertz. La mayoría de otólogos consideran que el



1. ESTETOSCOPIO ELECTRONICO empleado por el autor para detectar los sonidos musculares de baja frecuencia producidos por los músculos al contraerse. La parte superior de la ilustración muestra la disposición de un experimento típico de registro de sonidos musculares. El sujeto (*derecha*) sostiene un peso en su mano, mientras lleva colocado un micrófono en el bíceps. El observador (*izquierda*) escucha los sonidos amplificados a través de los auriculares. La señal eléctrica que emite el estetoscopio se procesa por ordenador siguiendo un programa conocido por transformación rápida de Fourier. El procedimiento rinde el espectro del sonido muscular: la densidad de potencia en función de la frecuencia. El espectro se registra también de forma gráfica. En la parte inferior se muestra el espectro de dos sonidos musculares, uno producido al sostener con la mano un peso de cinco kilogramos (*arriba*), y otro (*abajo*) si se levanta un peso de dos kilogramos. El sonido alcanza una intensidad máxima en la frecuencia de 25 hertz (ciclos por segundo).



2. SEÑAL ELECTRICA emitida por un estetoscopio electrónico. Cambia bruscamente cuando el músculo del brazo se contrae. La ilustración muestra un registro de la señal recibida a través de un micrófono conectado al palmar mayor (un músculo del antebrazo). Al inicio del registro (*izquierda*) el brazo estaba relajado; al cerrar la mano el músculo se contrajo y la amplitud de la señal aumentó bruscamente.

límite inferior de audición del oído humano está en los 20 hertz; sin embargo, por debajo de los 30 hertz la calidad tonal del sonido se pierde y el oyente describe la sensación como un rumor grave.

El estetoscopio electrónico nos brinda una excelente ayuda para superar esas dificultades. El componente principal es un micrófono, que actúa de transductor, convirtiendo las ondas de presión (las que llevan el sonido hasta el oído) en señales eléctricas. En la mayoría de estetoscopios electrónicos los micrófonos cuentan con un cristal piezoeléctrico, que transforma directamente los impulsos de presión en corriente eléctrica.

Un buen transductor electrónico responde uniformemente a todas las frecuencias no superiores a los 1000 hertz. La señal del cristal se modifica por medio de circuitos de estado sólido que amplifican los tonos de la frecuencia deseada. En el trabajo de los sonidos musculares se amplificaron todos los tonos de 15 a 100 hertz. La señal resultante puede reconvertirse en sonido, con un auricular, o bien plasmarse en imagen visual, como la que produce un osciloscopio.

Pese a las ventajas que ofrece el estetoscopio electrónico frente al mecánico, presenta un inconveniente: igual que amplifica los sonidos musculares, destaca los ruidos ambientales (el aire acondicionado, el tráfico e incluso las pisadas). Los sonidos ambientales de baja frecuencia resultan muy difíciles de filtrar. La frecuencia de un sonido es inversamente proporcional a su longitud de onda, y el tamaño de los filtros necesarios para bloquearlo aumenta con la longitud de onda. Los sonidos de elevada frecuencia, como el lenguaje hablado, el ruido de avión o una sirena, tienen una longitud de onda corta, razón por la cual los materiales de construcción los absorben fácilmente. Cuesta más eliminar los sonidos de frecuencias inferiores a 100 hertz. Así, un tono con una frecuencia de 20 hertz tiene una longitud de onda de unos 15 metros, con lo que, para impedir su llegada al estetoscopio electrónico, necesitaríamos un filtro de la magnitud de un edificio.

Puesto que no podíamos impedir a los sonidos extraños de baja frecuencia su acceso al micrófono, la salida del estetoscopio comprendía un componente aleatorio –el ruido– además del sonido muscular. Necesitábamos un método que separara la información útil de los ruidos; para ello empleamos un procedimiento matemático conocido por autocorrelación. La autocorrelación de las vibraciones fortuitas es un método formulado por G. I. Taylor, de la Universidad de Cambridge, para analizar la turbulencia de los fluidos. No entraremos aquí en los detalles matemáticos del procedimiento, que, en esencia, compara una señal con la misma señal desplazada en el tiempo. La información útil de la señal tiene una forma regular que se va manteniendo en el tiempo, como sucede con la forma de las ondas de presión de los sonidos musculares. En cambio, los ruidos ambientales no suelen mostrar esa regularidad, por lo que, si se desplaza la señal y se compara consigo misma, se realza la información útil y se elimina la inútil.

El proceso de la autocorrelación muestra que la frecuencia dominante en el sonido muscular es de 25 hertz. Manifiesta también que el sonido muscular no produce un tono puro, sino una gama de frecuencias. El espectro de un sonido que incluye varias frecuencias puede definirse como la densidad de potencia en función de la frecuencia. El espectro aproximado del sonido muscular alcanza un máximo de 25 ± 2,5 hertz. El sonido muscular equivale a un sonido aleatorio que atravesara un filtro que bloqueara todos los tonos de frecuencia inferior a 22,5 hertz o superior a 27,5 hertz.

Cabe preguntarse por qué se determinó el espectro del sonido muscular mediante el proceso de autocorrelación en lugar de hacerlo directamente con el estetoscopio electrónico. La razón es que el cálculo del espectro a partir de los datos de las vibraciones que proceden de las contracciones musculares era, hasta hace poco, de una lentitud exasperante, y muy costoso, incluso con los ordenadores digitales más rápidos.

El cálculo de esos espectros se ha simplificado notablemente gracias a un programa escrito por James W. Cooley, del centro de investigación Thomas J. Watson de la IBM, y por John W. Tukey, de los Laboratorios Bell y la Universidad de Princeton. El algoritmo en el que se basa el programa se denomina "transformación rápida de Fourier". Con él se reduce la cifra de cálculos de un millón a 5000, lo que supone dividir por 200 el tiempo que invierte el procedimiento.

La transformación rápida de Fourier ha ejercido un influjo poderoso en la mayoría de las disciplinas científicas. En el estudio de los sonidos musculares, el programa permite determinar el espectro exacto de un sonido, obviando la necesidad de referirse al espectro aproximado obtenido por autocorrelación. En nuestros experimentos conectábamos al estetoscopio electrónico una máquina capaz de efectuar la transformación rápida de Fourier. La máquina creaba el espectro del sonido muscular casi simultáneamente con la contracción muscular.

En un experimento normal, el sujeto

(generalmente Jaffe) sostenía un peso sobre la palma de su mano. En el bíceps se acoplaba un micrófono. Mientras sostenía el peso para mantener una contracción constante, la amplitud del sonido muscular era directamente proporcional al peso.

Por ser la amplitud del sonido proporcional al peso, la medición de los sonidos musculares podría emplearse para determinar la cantidad de trabajo que realiza un músculo. Sosteniendo un peso con la mano, el sonido procedente del bíceps era mínimo cuando el ángulo que formaba el antebrazo con la parte superior del brazo era de 115 grados. Los levantadores de pesas saben bien que ése es precisamente el ángulo con el que el brazo puede sostener más carga.

Con el sujeto estirado en posición prona, boca abajo, el gemelo (el más importante de los músculos de la pantorrilla) casi no se oía; con el sujeto de pie, se percibía nítido el sonido y, con el sujeto de puntillas, el sonido era intenso. Estando Jaffe de puntillas sus gemelos producían un sonido de igual intensidad que el que emitía el brazo al sostener siete kilogramos, el mayor peso que aguantaba.

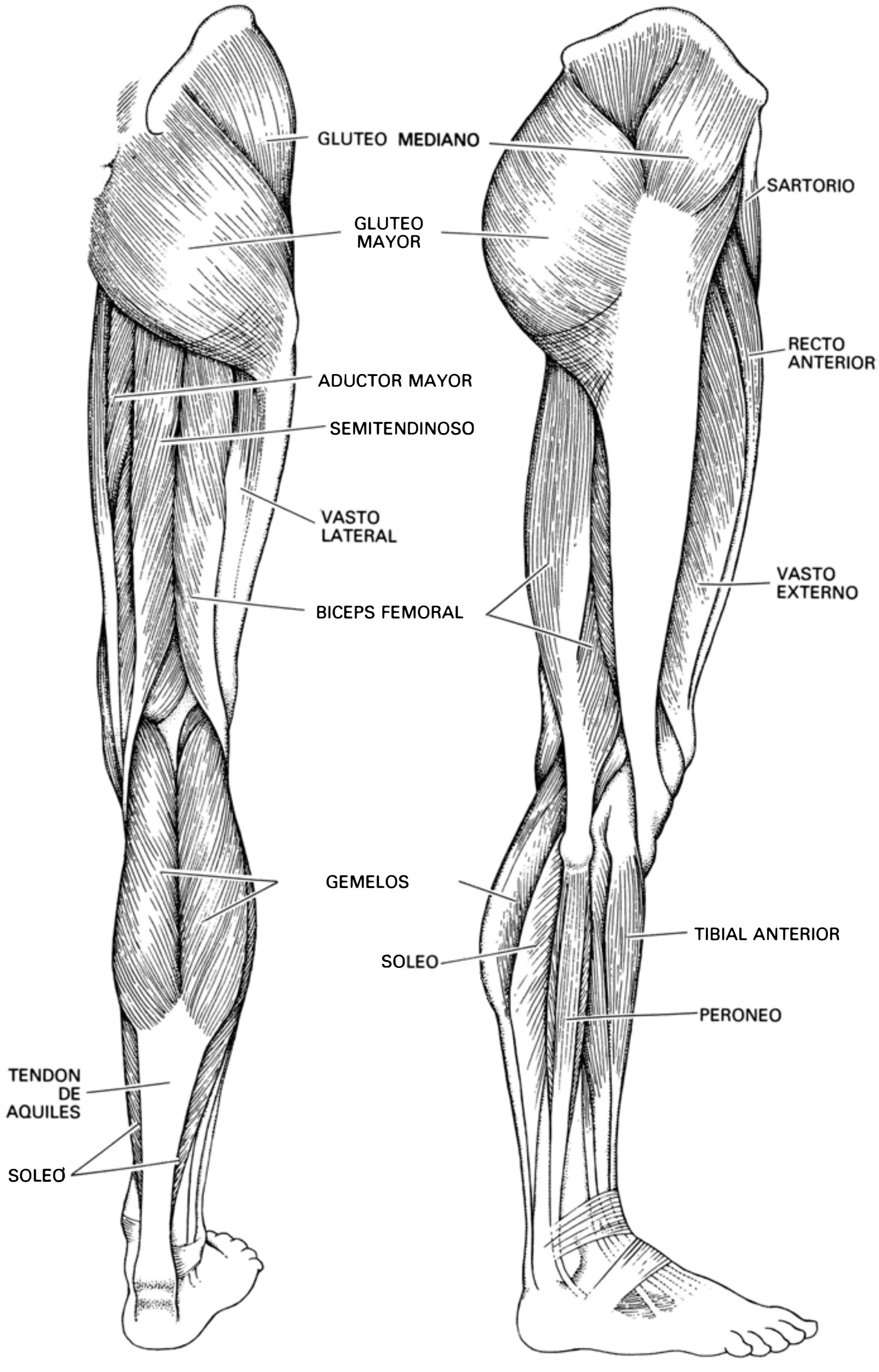
Cuando medimos los sonidos musculares que producía una bailarina profesional comprobamos que no podía sostener con su mano tanto peso como Jaffe; sin embargo, al ponerse de puntillas, el sonido del gemelo era mucho más intenso que el de éste. El entrenamiento de la bailarina para mantenerse de puntillas parecía haberle hecho adoptar una posición distinta de la de Jaffe. Cabe pensar, por tanto, que el sonido muscular sirve para conocer qué músculos operan en una maniobra física concreta.

En el caso del sóleo, otro músculo de la pantorrilla, utilizamos un micrófono miniatura, de medio centímetro; observamos que, con el sujeto de pie, el sonido de ese músculo era casi 10 veces más intenso que el del gemelo. La intensidad del sonido del sóleo guarda relación con su fisiología y con el papel que desempeña en la locomoción. Responsable de que se mantenga la angulación entre la pierna y el pie, su intervención en el mantenimiento de la postura erecta es esencial.

De pie, andando o corriendo, el sóleo se contrae muchas veces durante un largo período de tiempo, sin llegar a fatigarse, lo que contrasta con los demás músculos esqueléticos, que se cansan con mayor facilidad. Parece que el ritmo de transformación de energía del sóleo es considerablemente inferior al de los otros músculos. La resistencia del sóleo responde a su gran riqueza en mitocondrias, los orgánulos celulares que contienen las enzimas oxidativas necesarias para la producción de ATP (adenosín trifosfato), el combustible energético de la célula.

Las fibras denominadas de contracción lenta contienen muchas mitocondrias; las de contracción rápida, pocas. Obviamente, las fibras de contracción lenta revisten interés en las actividades que impliquen gran resistencia, en tanto que las de contracción rápida intervienen en actividades en las que predomina la velocidad. En el sóleo abundan las fibras de contracción lenta, por lo que ese músculo estará más desarrollado en un campeón de maratón que en un velocista. Si registráramos diariamente la intensidad del sonido del sóleo y la comparáramos con la del gemelo, quizá sacaríamos una medida del avance en el entrenamiento de un corredor de maratón.

Los sonidos musculares también tienen aplicación en el estudio del comportamiento animal. Se captan bien dentro del agua; por ejemplo, si colocamos la cabeza bajo el agua y cerramos



3. ANATOMIA DEL MIEMBRO INFERIOR. El sóleo y el gemelo son los dos músculos más importantes de la pantorrilla. Con el sujeto de pie, el sonido emitido por el sóleo es casi diez veces más intenso que el emitido por el gemelo. Al sóleo corresponde mantener el ángulo entre la pierna y el pie. Está constituido mayoritariamente por fibras de contracción lenta, que pueden contraerse muchas veces sin fatigarse.

la mano cerca de la oreja, percibiremos el sonido muscular. La razón de que un sonido se oiga mejor a través del agua que en el aire débese a que el aire es 1000 veces menos denso que los tejidos humanos. Esa diferencia de densidades hace que el sonido se transmita mal de un medio a otro. Por su densidad mayor que la del aire, la transmisión del sonido muscular a través del agua resulta más eficaz.

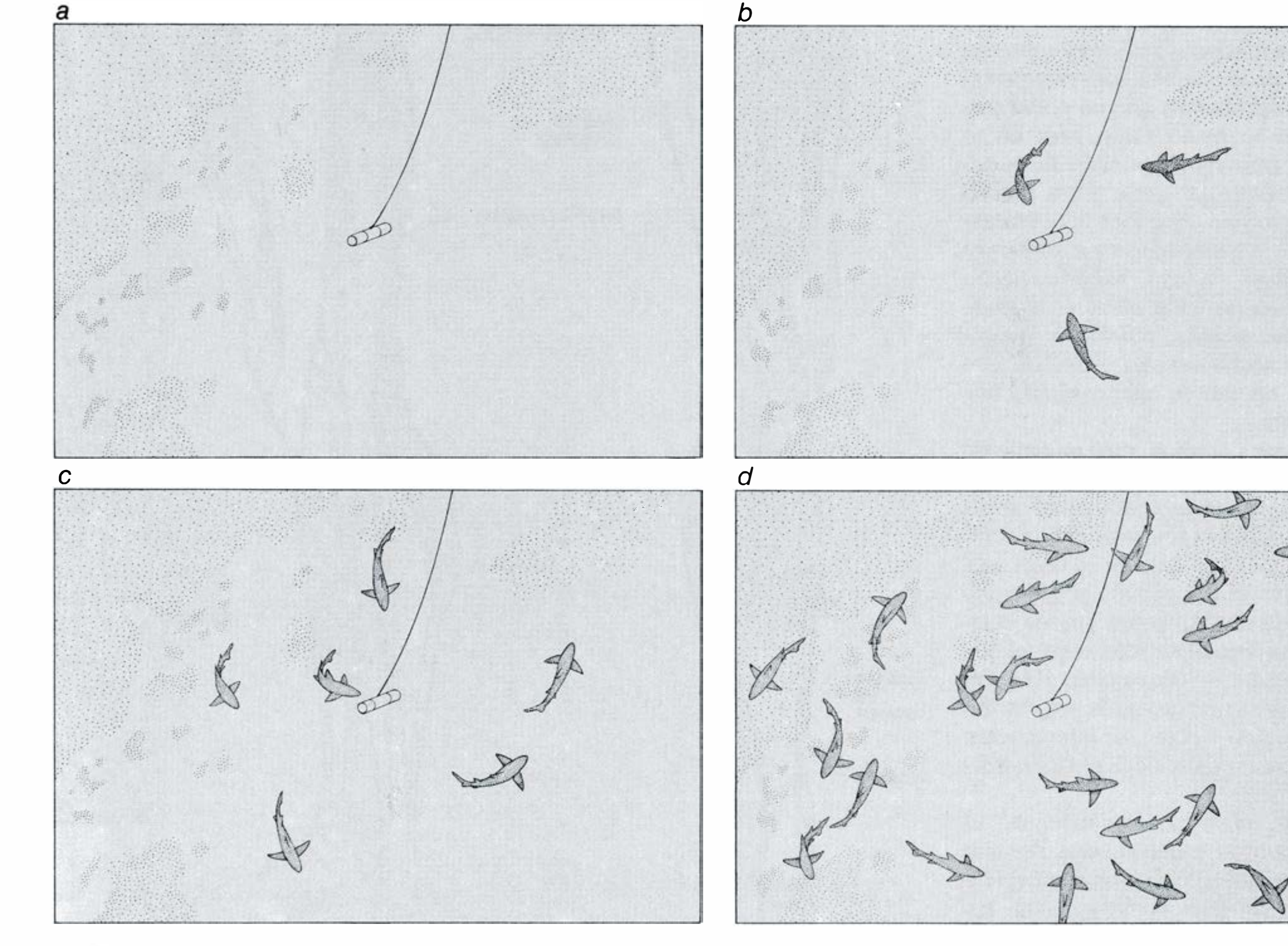
Uno de los pocos peces que pueden oírse desde la superficie del agua es el gurami (*Trichopsis vittatus*). Otras especies emiten sonidos por vibración de su vejiga natatoria, órgano dilatable que les permite mantener la flotabilidad. *T. vittatus* sólo produce sonidos al efectuar ciertos movimientos, rápidos y violentos, asociados con el apareamiento. Los sonidos no parecen provenir de la vejiga natatoria ni de las turbulencias del agua, por lo que es bastante probable que se deban a la contracción muscular.

Algunos tiburones sienten atracción por los sonidos de baja frecuencia. En 1963, Donald R. Nelson y Samuel H. Gruber, de la Institución Scripps de Oceanografía, demostraron que los tiburones limón respondían a sonidos cuyas frecuencias oscilaban entre 20 y 50 hertz. Las frecuencias situadas fuera de ese intervalo no les atraían.

Nelson, actualmente en la Universidad estatal de California en Long Beach, demostró que los sonidos intermitentes de baja frecuencia que emitía por un altavoz colocado en el agua atraían intensamente a los tiburones grises que habitan los arrecifes del Pacífico. También se aproximaban al altavoz si emitía un sonido similar al que produce un pez atrapado en un anzuelo o en la boca de un tiburón. Parece probable que los intensos sonidos musculares que emite un pez en lucha atraigan a los tiburones.

Los sonidos musculares pueden constituirse en medio de comunicación entre los mismos embriones. Margaret A. Vince, del Consejo Británico de Investigaciones Agrarias, detectó sonidos de baja frecuencia en huevos de codornices japonesas. Usando un transductor especialmente diseñado para captar los sonidos de esos huevos, Vince descubrió que el sonido empezaba cuatro días antes de la eclosión. Para ver el embrión practicó un orificio en la cáscara y lo cubrió con plástico transparente. A través de esa ventana observó que se producían movimientos musculares cada vez que se emitían ruidos. Otras pruebas sugieren que quizá los sonidos musculares estimulen a otros embriones a iniciar sus esfuerzos para salir del huevo. Según Vince, los sonidos musculares explicarían el hecho de que los huevos que mantienen contacto con otros se abran antes que los huevos que no están en contacto.

¿Cuál es el origen de los sonidos musculares? Por lo que se ve, proceden de la acción de las fibras musculares, en particular de las fibras de contracción rápida. Con fines experimentales, se montan fibras de contracción rápida entre soportes mecánicos. Cuando aquéllas se estiran hasta una distancia fija y se estimulan entonces eléctricamente, las fibras ejercen una fuerza sobre los soportes. La fibra no

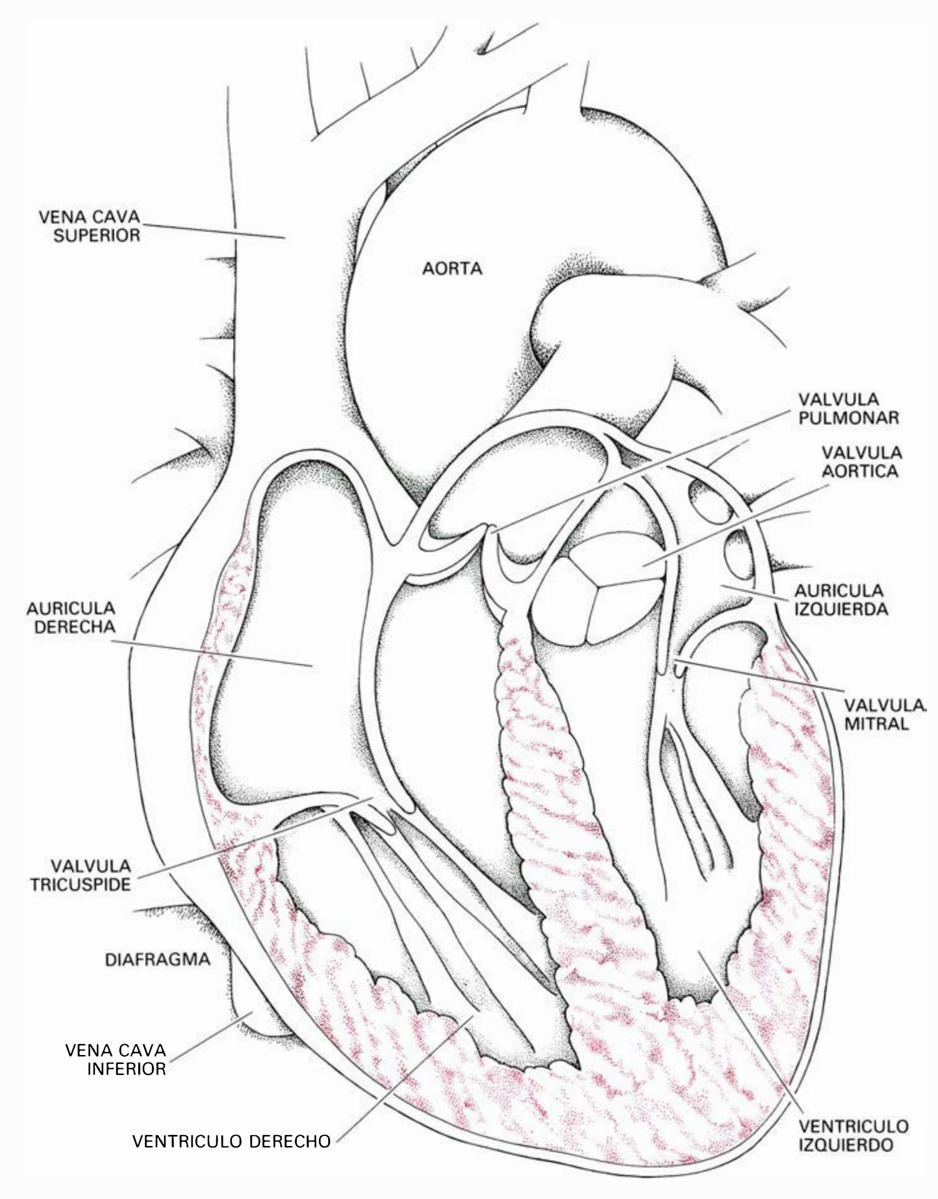


4. LOS TIBURONES DEL PACIFICO sienten atracción por los sonidos de baja frecuencia emitidos por un altavoz sumergido. Estas ilustraciones se basan en fotogramas de una película de Donald R. Nelson y Richard H. Johnson, de la Universidad estatal de California. El altavoz se situó a 15 metros por debajo de la superficie. Al comenzar la emisión no había tiburones en la zona (*a*); 30 segundos después ya rondaban varios ejemplares (*b* y *c*) y a los dos minutos más de 20 rodeaban el altavoz (*d*). Los sonidos musculares de baja frecuencia quizás alerten a los tiburones de la presencia de una presa.

puede acortarse, pero midiendo la fuerza ejercida sobre los soportes se evalúa la respuesta. En esas condiciones, las fibras rápidas responden en unos 40 milisegundos, esto es, una venticincoava parte de segundo, aproximadamente el tiempo necesario para la utilización y regeneración del ATP. Se supone que el ciclo de recambio del ATP controla las reacciones químicas que subyacen a la contracción muscular. Es de destacar que un veinticincoavo de segundo es el tiempo que se tarda para completar un ciclo de un tono de 25 hertz.

Varios autores han corroborado que las fibras musculares vibran ante el más ligero cambio de la carga del músculo. Clara Franzini-Armstrong, Andrew F. Huxley y F. J. Julian, del University College de Londres, han trabajado con fibras de músculo de rana. Las fibras se sometían a tensión y se variaba cuidadosamente la carga. Demostraron que cuando aumentaba o disminuía la carga, las fibras vibraban a lo largo de su eje mayor a una frecuencia de 25 hertz. Para detectar esas mínimas variaciones de longitud, de aproximadamente un uno por ciento de la longitud de la fibra, debían valerse de instrumentos muy sensibles.

G. Goldspink, R. E. Larson y R. E. Davies, de la Universidad de Pennsylvania, trabajaron con el músculo dorsal ancho anterior de polluelos de 24 días. Ese músculo de la espalda es de contracción rápida, al igual que los demás de la carne blanca de los pollos. (La oscura se compone de músculos de contracción lenta.) Aplicando una técnica algo diferente de la empleada por los investigadores londinenses, encontraron que se producía una vibración de una frecuencia aproximada de 25 hertz al cambiar la tensión de las fibras del dorsal ancho anterior.



5. DURANTE EL CICLO CARDIACO el corazón emite varios sonidos. El primer ruido marca el inicio de la fase sistólica, o de contracción. Se ha sugerido que ese primer ruido responde al cierre de la válvula mitral o al cambio brusco de presión que se produce en el ventrículo izquierdo (la cámara cardiaca más potente). Podría corresponder, no obstante, al sonido muscular emitido por el ventrículo izquierdo.

Tales experimentos prestan sólido apoyo a la hipótesis según la cual las fibras de contracción rápida originan los sonidos musculares. Sin embargo, otro tipo de vibración muscular, el temblor fisiológico, podría también intervenir en la producción de sonido. Se observa ese temblor al señalar con un dedo una palabra de esta página, por ejemplo. El dedo mostrará una oscilación de 10 hertz, resultante de un complejo sistema de retroalimentación neurológico.

Con la colaboración de Jaffe, decidí estudiar si el temblor fisiológico contribuía o no a los sonidos musculares. Efectuamos las mediciones sumergiendo el brazo que sostenía un peso en un recipiente con agua helada, o reduciendo considerablemente el retorno venoso del miembro. Con esas maniobras se elimina, o disminuye considerablemente, el temblor fisiológico. Aún así, los sonidos musculares no resultaron afectados.

Puede, por tanto, excluirse cualquier contribución por parte del temblor fisiológico, y concluir que el tono de 25 hertz proviene sólo de las fibras rápidas. Las numerosas fibras musculares que constituyen un músculo pueden compararse a un conjunto de osciladores, que vibraran todos a la misma frecuencia, aunque no necesariamente con la misma fase. En un músculo determinado, unas fibras pueden estar, con respecto a otras, en fase, completamente desfasadas o en una fase intermedia. Tensando el músculo se produce un abombamiento y aumento del grosor del haz de fibras, lo que genera vibraciones en las fibras componentes. El movimiento, a su vez, origina ondas de presión de 25 hertz.

Cuando se contrae un músculo, el tono sordo no aparece de inmediato. Ante ligeros ejercicios del músculo, se registran a veces breves descargas sonoras, una suerte de "click". Al intensificar la fuerza, los intervalos entre cliks se acortan y llegan a confundirse en el sonido muscular.

Esos golpes sonoros los producen las subunidades musculares, llamadas unidades motoras. Se define como unidad motora el grupo de fibras musculares activadas por un solo nervio; su tamaño, así como su forma de acción, varía grandemente de acuerdo con la función del músculo.

Cada unidad motora del músculo gemelo consta de unas 2000 fibras. No ac-

túan simultáneamente al caminar o al correr. La fuerza ejercida por el músculo aumenta lentamente a medida que se activan más unidades motoras. Al propio tiempo, las unidades fatigadas dejan de funcionar, para recuperarse. Tal patrón de alternancia persiste mientras dura la contracción muscular.

En el orbicular del párpado, cada unidad motora sólo consta de 20 fibras. La respuesta del párpado a la orden de cierre tarda unos 50 milisegundos, esto es, una veinteava parte de segundo. Sigue la ley del todo o nada: todas las unidades motoras actúan juntas. La precisión y velocidad de la acción requiere que las unidades motoras sean pequeñas.

G. F. Gordon y A. H. S. Holbourn, de la Universidad de Oxford, detectaron, en 1948, los clicks que preceden al ruido muscular sordo, precisamente en el orbicular de los párpados. Se valieron de un pequeño micrófono. La acción de las unidades motoras del párpado es tan inequívoca que se percibe cada una por separado. Si colocamos suavemente el dedo medio sobre el párpado, notaremos de vez en cuando una pulsación: se trata de la contracción de una unidad motora, y se corresponde con el click que oímos a través del micrófono.

Delbert D. Thiessen, de la Universidad de Texas en Austin, propuso que los jerbillos utilizaban los clicks de las unidades motoras para comunicarse entre sí. Al colocarlos en jaulas separadas, empezaban a acicalarse simultáneamente, operación que iba precedida de un rápido aleteo de los párpados. Tras descartarse varios mecanismos potenciales de señalización, olor incluido, parece verosímil que el entendimiento se efectúe mediante las descargas sonoras producidas por el orbicular de los párpados.

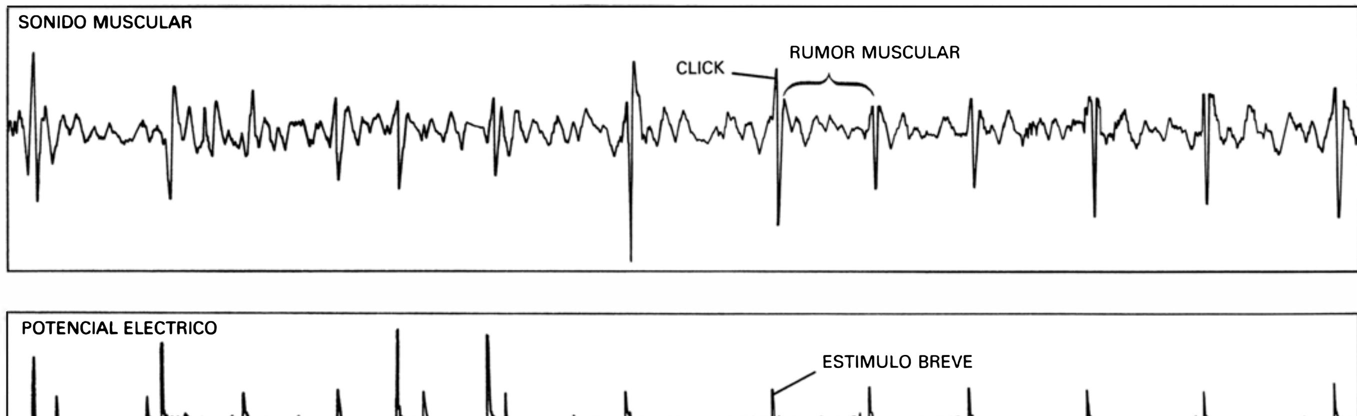
Por electromiografía se ha confirmado la conexión entre la activación de la unidad motora y el click. En esta técnica se insertan en los músculos, cerca de una unidad motora, pequeños electrodos en forma de aguja. Los electrodos captan el potencial de acción que acompaña a la contracción de las fibras musculares. (El potencial de acción es un breve aumento del potencial eléctrico de la célula, de aproximadamente una centésima de volt.)

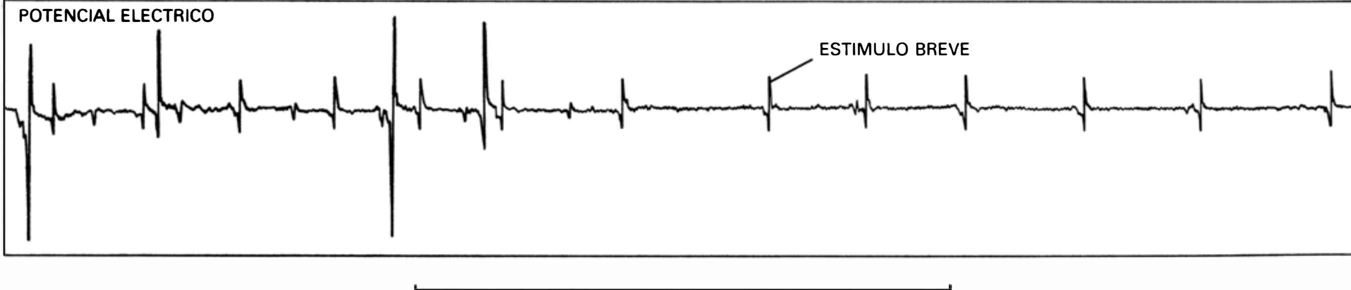
Gordon y Holbourn observaron, en el párpado, la coincidencia entre clicks y ondas rápidas del registro miográfico, pero no lograron demostrar su emisión por parte de los músculos de las extremidades. Pero D. T. Barry y S. R. Geiringer, de la Universidad de Michigan, lo acaban de conseguir para los músculos de la pierna; en concreto, se trataba del registro de un músculo grueso de una persona en estado de reposo. Al igual que en el experimento de Holbourn y Gordon, la emisión de clicks coincidía con las ondas rápidas del electromiograma.

El estudio de los sonidos cardiomusculares conllevará importantes beneficios, ya que la acción de bombeo del corazón emite varios sonidos; los dos más importantes se conocen con el nombre de primer y segundo ruidos cardiacos. El primer ruido indica el principio de la sístole (fase de contracción) y, el segundo, la fase de relajación, el principio de la diástole. He comprobado que el espectro del primer ruido alcanza un máximo de 22 hertz, y que el segundo ruido es algo más agudo.

El origen de los sonidos cardiacos es controvertido, aunque dos teorías ampliamente aceptadas pretenden explicar el primer ruido, a saber: la hipótesis del chasquido valvular y la del martillo de agua. La primera fue propuesta por Pierre Rouanet, médico de Nueva Orleans, en 1830, quien atribuyó el primer sonido a las reverberaciones del cierre de la válvula mitral (que comunica la aurícula izquierda con el ventrículo izquierdo); sin embargo, estudios por ultrasonidos han demostrado que el primer ruido empieza antes del cierre valvular.

La hipótesis del martillo de agua, defendida por Robert F. Rushmer, de la Universidad de Washington, se basa en que el primer ruido se parece al que produce un grifo de un tendido de tuberías mal diseñado cuando se cierra rápidamente. (En un sistema bien diseñado, una cámara de aire evita el martillo de agua.) Al cerrarse la válvula mitral, la presión sanguínea aumenta rápidamente; la consiguiente dilatación brusca del ventrículo izquierdo causaría





6. UNA DESCARGA DE SONIDO MUSCULAR, un "click", es el resultado de un estímulo nervioso de poca intensidad. La parte superior registra el sonido muscular del vasto interno, un gran músculo de la pierna. El registro inferior es el potencial eléctrico de ese músculo. Al sujeto se le ordenó que pensara en contraer los músculos de la pierna, pero sin llegar a hacerlo. Se produjo entonces una serie de breves impulsos nerviosos, que se traducían en picos en el registro inferior. Cada pico coincidía, en el registro superior con un click, el sonido que emiten las fibras de una sola unidad motora. Se define como unidad motora el grupo de fibras musculares activadas por un nervio. En el registro superior se aprecia, entre clicks, un rumor de 25 hertz.

una súbita reverberación que generaría el primer ruido.

En esta hipótesis se relega el músculo cardiaco a un papel secundario. Sin embargo, el sonido muscular es más intenso cuando la fuerza de contracción es máxima, lo que sugiere que el primer sonido cardiaco deriva de la contracción muscular, sin que importe demasiado la dinámica de la válvula mitral o del ventrículo izquierdo.

Esta hipótesis está avalada por varios experimentos realizados con ranas. Al poner un micrófono en contacto directo con el ventrículo de un corazón de rana comprobé que los sonidos musculares eran bastante similares a los de un corazón humano, a pesar de las diferencias de tamaño existentes entre uno y otro. Según el modelo del martillo de agua, el sonido producido por el músculo cardiaco de la rana habría de tener una frecuencia superior, pues la dilatación de un ventrículo de poco tamaño debe generar una reverberación más aguda que la de un ventrículo mayor. La hipótesis del martillo de agua pierde más fuerza aún ante la observación de que el corte del riego sanguíneo al corazón no altera el sonido. Parece, por tanto, que la fuente principal del primer ruido es la contracción muscular.

Más de un tercio de las muertes que ocurren en Occidente se producen por la degeneración del músculo cardiaco. Los sonidos musculares podrían constituirse en valiosa herramienta para el diagnóstico de esa patología. El análisis detallado del espectro del sonido muscular podría revelar el estado de los tejidos y permitiría diagnosticar un infarto de miocardio: la degeneración de una zona del músculo cardiaco por falta de riego sanguíneo. Con el propio estetoscopio mecánico se aprecia ya una onda anormalmente grave durante el primer ruido en pacientes con infarto de miocardio avanzado; para obtener registros más objetivos podría aplicarse la transformación rápida de Fourier a la auscultación cardiaca.

Junto a estas prestaciones clínicas, el estudio de los sonidos musculares contribuiría al mejor conocimiento del mecanismo básico de la contracción muscular. En este sentido, F. V. Brozovich y Gerald H. Pollack, de la Universidad de Washington, han descubierto que el músculo de la rana emite el sonido en una forma de descargas secuenciales. Ello sugiere que cuando un músculo se contrae lo hace por pequeños pasos discretos. De ser así, ello contrastaría con la opinión dominante, según la cual la contracción de los músculos es un proceso continuo que opera en el plano molecular.

Adaptabilidad del ratón doméstico

La capacidad reproductora de este micromamífero destaca por su gran flexibilidad. Le permite colonizar con éxito múltiples hábitats, en particular aquellos que comparte con el hombre

F. H. Bronson

El ratón doméstico es un comensal oportunista de la especie humana que tiene en su haber una espectacular historia de colonización global. Un comensal vive y se alimenta en asociación estrecha con otra especie, sin beneficiarla o dañarla directamente. El *Mus domesticus* comenzó su coexistencia con el hombre, hace tal vez 8000 o 10.000 años, en las estepas de Asia. Desde entonces, y en gran parte transportado inadvertidamente por la gente, se ha instalado en todas las aglomeraciones humanas, pequeñas y grandes. Vive en las casas, establecimientos comerciales, graneros y almacenes, del Ecuador a las regiones subpolares. Sobrevive en microclimas artificiales tan dispares como tuberías de calefacción o cámaras frigoríficas.

El ratón doméstico, sin embargo, no es un comensal estricto. En muchos lugares ha vuelto a la vida salvaje, donde se desenvuelve con total independencia del hombre; en ese caso puede encontrarse en los hábitats más dispares: atolones de coral, prados, desiertos, zonas pantanosas, dunas costeras o valles alpinos.

El evidente éxito colonizador de nuevos medios que muestra la especie ha interesado enormemente a los fisiólogos que estudian la reproducción. Introducirse en un medio totalmente nuevo es una cosa; ser capaz de reproducirse en él y perpetuar una población nueva es otra muy distinta. La amplia distribución mundial del ratón doméstico, tanto en medios naturales como en los humanos, sugiere una extrema adaptabilidad reproductora, probablemente la más alta entre los mamíferos. Revisaremos aquí el conjunto de adaptaciones especialmente flexibles que componen la esencia del extraordinario éxito de la estrategia reproductora del ratón doméstico. No obstante, y en un nivel distinto, se discutirá cómo los experimentos de laboratorio pueden completar las observaciones de campo, y viceversa. Ninguna de estas aproximaciones se ha mostrado suficiente, por sí sola, para desentrañar la flexibilidad reproductora de esta especie.

Como introducción al conocimiento de los particulares procesos reproductores del ratón doméstico resultará útil comparar las reglas que determinan la procreación en esa especie con las que la determinan en el resto de los mamíferos. La reproducción de los mamíferos se realiza siempre de acuerdo con tres grupos de variables ambientales interrelacionadas: la dieta, el medio físico y el medio social. La dieta constituye el principal regulador ambiental de la reproducción en mamíferos; y quizás el factor dietético fundamental sea simplemente el número de calorías disponibles para la reproducción.

En otras palabras, todos los mamíferos tienen que comer. Deben extraer energía del alimento y repartirla entre un conjunto de necesidades, de las cuales la reproducción sólo constituye una más. Nutrientes específicos, como vitaminas y aminoácidos, deben también distribuirse entre las necesidades reproductoras y no reproductoras.

Estrechamente relacionados con esos factores dietéticos se encuentran dos aspectos del medio físico. En primer lugar, dado que la regulación de la temperatura del mamífero requiere energía, la temperatura ambiente puede tener una influencia destacada en el proceso de reparto energético. En segundo lugar, el fotoperíodo diario (la duración de la fase diurna en un ciclo de 24 horas) puede inducir a un mamífero a predecir (o percibir) la proximidad de una estación en la que pueda realizarse la cría. Sustancias específicas asociadas con la vegetación temprana pueden producir los mismos efectos en algunos mamíferos. La alternancia día-noche se incluye en el ciclo de 24 horas que condiciona las actividades reproductoras de la mayoría de los mamíferos. Finalmente, el medio social produce estímulos que pueden actuar, específicamente, sobre fenómenos temporales tales como la ovulación o, de forma no específica, promoviendo estados de aversión emocional que entorpecen la reproducción.

Destacando de este escenario, el primer aspecto de la flexibilidad reproductora del ratón doméstico aparece en relación con la cría estacional. La mayoría de los mamíferos viven en hábitats que se caracterizan por variación estacional en disponibilidades de alimento. La mayoría, por tanto, cría estacionalmente. Casi todos los mamíferos se valen de un factor predictor, como el fotoperíodo, para incrementar su eficacia estacional; por contra, el ratón doméstico no parece seguir las pautas marcadas por ningún factor predecible, ni se reproduce con esa regularidad.

La conclusión de que el ratón doméstico no reacciona ante las variaciones del fotoperíodo, por ejemplo, se basa en observaciones de campo y de laboratorio. Los biólogos de campo han encontrado que la especie se reproduce estacionalmente o de forma continua a lo largo del año; ello dependerá sólo de cuál sea su hábitat. En estructuras artificiales de los trópicos y en las regiones de la zona templada se multiplica de manera continua, pero en hábitats naturales lo hace con regularidad estacional.

Observación que no debiera sorprendernos. Almacenes y graneros, obviamente, amortiguarían, hasta cierto punto, las situaciones extremas del clima o de la dieta que pudieran afectar al ratón. Por otro lado, esa observación sugiere que la especie, como tal, no responde al fotoperíodo, o que sólo el ratón doméstico de hábitats naturales es susceptible de dicha regulación. Los experimentos de laboratorio confirman la primera hipótesis. Se ha estudiado recientemente cepas salvajes de ratones domésticos, entre ellas algunas que medran en hábitats naturales; todos se reproducen por igual sin que importe la longitud del día.

Interesa señalar que por lo menos algunas de las cepas salvajes estudiadas en el laboratorio se reproducen a pleno rendimiento, incluso cuando se las somete a meses de total oscuridad. R. C. Stoddart, de la Universidad de Glasgow, lo demostró con una cepa salvaje de Escocia. En mi laboratorio, de la Universidad de Texas en Austin, hemos confirmado sus resultados con dos cepas norteamericanas, una procedente de Alberta y otra de Texas. Ello concuerda con esporádicas observaciones de colonización de minas de carbón por parte del ratón doméstico a profundidades de 550 metros, donde la luz que emplean los obreros puede ser constante, aleatoriamente intermitente o nula.

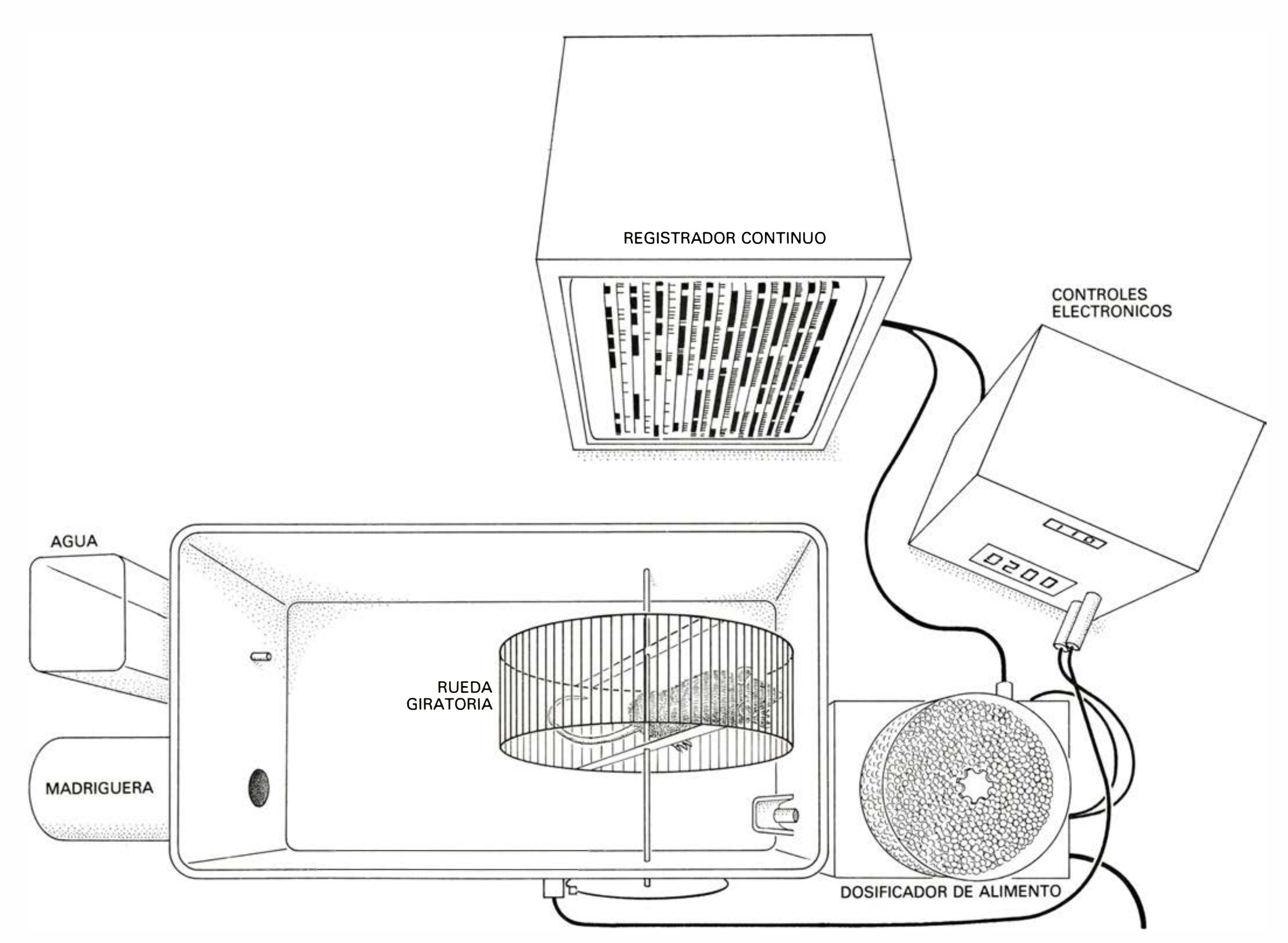
Aunque la independencia respecto de un fotoperíodo explica la ausencia de reproducción estacional, por sí misma no aclara qué sea lo que inhibe la procreación del ratón doméstico durante algunas estaciones en hábitats naturales, ni tampoco su capacidad para reproducirse con éxito en tan amplia variedad de lugares. La comprensión de ese fenómeno requiere el estudio de la dieta y de los inhibidores climáticos. Por desgracia, es imposible separar qué importancia proporcional corresponde a las calorías, nutrientes y la variación de temperatura bajo condiciones naturales: se modifican simultáneamente con la localización y con el cambio de estación. Se torna imperiosa, pues, la exigencia de recurrir a experimentos controlados en el laboratorio.

En mi laboratorio nos hemos ocupado de los factores que limitan la reproducción. En particular una línea de investigación, relacionada con el reparto energético ya mencionado, resultó muy provechosa a la hora de identificar la estrategia de colonización de la especie.

Abordamos el reparto fisiológico de la energía en una ecuación donde el número de calorías asimiladas con el alimento debe igualar la suma de las demandas: mantenimiento de la biomasa, crecimiento, reproducción, termorregulación, almacenamiento en forma de grasa y, sobre todo, gasto energético del desplazamiento para obtener alimento. Un aumento en la demanda energética de una de esas necesidades puede satisfacerse sólo a expensas de una disminución en una o todas las restantes, o por un incremento de la incorporación de alimento.

Nos proponíamos investigar la capacidad reproductora del ratón a medida que alterábamos, de varias formas, los factores de dicha ecuación, aunque siempre dentro de una verosimilitud ecológica; se modifica la cantidad de alimento disponible, el tiempo de búsqueda, es decir, la asequibilidad de dicho alimento y la temperatura a la que se realiza la búsqueda. Tras lo cual, el estudio del reparto competitivo de la energía nos determinará los límites potenciales de la reproducción de la especie.

Así se ha podido establecer algunos



1. MONTAJE EXPERIMENTAL diseñado para estudiar la energética del desarrollo reproductor del ratón doméstico. Con él se pretendía simular las condiciones que el ratón encuentra en hábitats naturales y aislar las variables principales. En esta jaula, el animal vive en una madriguera térmicamente estabilizada (*a la izquierda*), pero debe entrar en el área abierta y dar un número determinado de revoluciones en la rueda giratoria para obtener una ración de comida de 45 miligramos, que le proporciona el dispositivo de la derecha. Un registrador (*arriba*) graba el número de revoluciones de la rueda y el número de raciones suministradas. La caja de la derecha contiene controles que regulan el aparato. Este equipo permite establecer las relaciones de interacción entre temperatura, búsqueda de comida, crecimiento, engorde y desarrollo reproductor. El aparato lo diseñaron el autor y Glenn H. Perrigo.

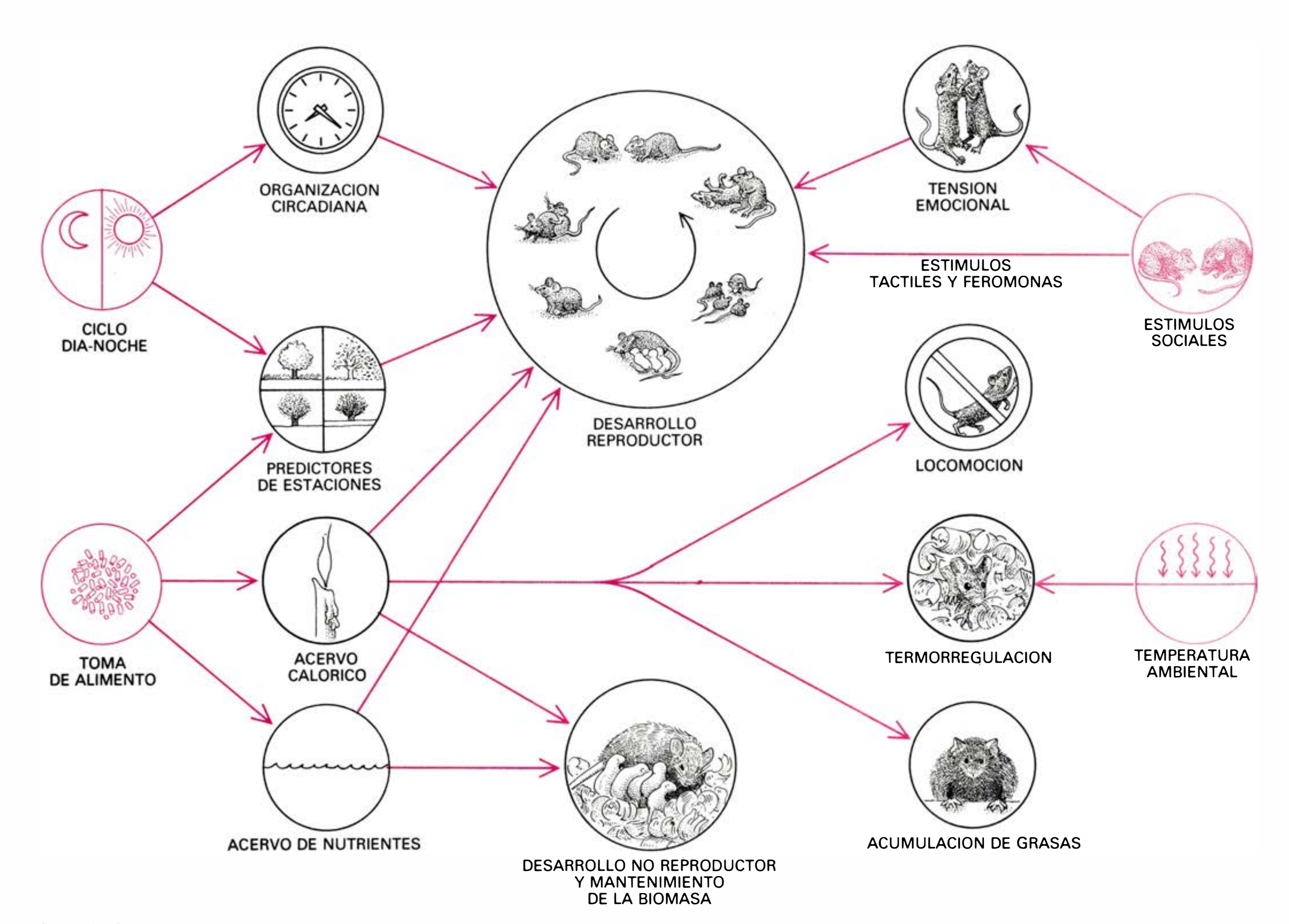
principios fundamentales relacionados con el éxito reproductor. En primer lugar, el fracaso reproductor, tanto si cabe atribuirlo a la estación o a la localidad, probablemente refleje desequilibrios simples de la ecuación energética. En segundo lugar, los desequilibrios sólo parecen afectar de forma negativa a la capacidad reproductora de las hembras. Por último, el ratón doméstico, de ambos sexos, muestra una tolerancia sorprendentemente amplia a ciertos componentes de la ecuación.

La conclusión de que las hembras desempeñan el papel crítico deriva de experimentos sencillos sobre la disponibilidad de alimento. Siempre que se restringe la cantidad suministrada a una hembra joven (al final de la época de lactancia), se altera su desarrollo reproductor. Cualquier grado de inhibición de su crecimiento comporta el fracaso total de su desarrollo sexual o un desarrollo anormalmente lento. Los machos, en cambio, experimentan un desarrollo reproductor normal aun cuando la escasez de alimento llegue a inhibir por entero su crecimiento. Ocurre, en efecto, que machos jóvenes pierden peso, pero maduran sexualmente.

En términos de la ecuación bioenergética, el crecimiento muestra, en las hembras, una prioridad competitiva mayor que el desarrollo reproductor, mientras que en los machos sucede lo contrario. Lo que nos lleva a una situación donde la escasez de alimento controla la reproducción de la especie actuando sólo sobre un sexo.

Los estudios sobre restricción de alimento son de un valor limitado en una investigación con la amplitud de objetivos como la nuestra. Un animal salvaje rara vez sufre una escasez de alimento si no se presenta ningún cambio climático (en particular, un cambio de temperatura), ni se enfrenta a la falta de recursos desprovisto de capacidad de conseguirlos con una búsqueda más intensa o prolongada. Para reproducir lo mejor posible esas complejas condiciones, Glenn H. Perrigo y el autor desarrollaron un singular sistema de reclusión. Además de aportarnos la primera simulación significativa de los cambios energéticos que muestra un animal pequeño en el campo, el sistema nos ha permitido descomponer la ecuación bioenergética que controla la reproducción en la hembra. Así descubrimos el determinante ambiental que probablemente constituya la base del éxito reproductor del ratón doméstico: la relación entre la disponibilidad de alimento (y con ello el tiempo de búsqueda para el mantenimiento de la dieta) y la temperatura reinante en el medio donde la hembra se nutre.

La primera clave para comprender la importancia de esa relación nos la ofrece la mera constatación del tamaño del ratón doméstico: muy pequeño. Se sabe desde hace tiempo que los micromamíferos poseen una elevada relación superficie/peso, que determina una súbita pérdida de calor cuando la temperatura baja. La segunda clave es que el ratón doméstico construye un nido con un alto grado de estabilización térmica, por lo que su exposición a las temperaturas exteriores se limita a las expediciones en busca de alimento.



2. FACTORES AMBIENTALES que regulan la reproducción de un mamífero. Entre los principales se cuentan: ciclo día-noche, toma de alimento, estímulos sociales y temperatura ambiental. Las funciones interactuantes que quedan reguladas por esos factores completan el resto del diagrama. Un objetivo fundamental de los experimentos del autor fue esclarecer el reparto competitivo de la energía entre distintas funciones: crecimiento, reproducción, termorregulación (el control de la temperatura del cuerpo), almacenamiento de grasas y costos locomotores del animal en su búsqueda de comida.

Si el alimento escasea, invierte más tiempo en la búsqueda. Que la aventura sea rentable o no dependerá de la temperatura a la que se realice la búsqueda. Obviamente existirá un conjunto umbral de condiciones determinadas por la estación o la geografía, a las que la escasez de alimento y las bajas temperaturas se combinen de tal modo que la búsqueda rentable, e incluso la vida, resulten imposibles para el ratón. A medida que las condiciones ambientales se aproximan a ese umbral, la ecuación bioenergética está dominada progresivamente por la necesidad de regular la temperatura. El primer factor que sufre esa retirada de energía es la capacidad reproductora de la hembra.

La extraordinaria importancia de tal relación (disponibilidad de alimento, duración de su búsqueda y temperatura ambiente) se plasmó con toda su crudeza en uno de los primeros experimentos de Perrigo con nuestro nuevo sistema de jaulas. Se adaptaron hembras jóvenes de forma gradual a temperaturas relativamente bajas (10 grados Celsius, con una temperatura ambiente en el laboratorio de 23 grados), y se les daba alimento en exceso o se les hacía andar cien o doscientas vueltas en la rueda giratoria por cada ración de alimento suministrada. Estas condiciones reproducen la actividad que mantiene el ratón en muchos hábitats naturales durante los cambios de estación. El invierno es la estación en que escasea el alimento y cuando el ratón debe buscar con mayor ahínco e invirtiendo más tiempo (y a la temperatura más baja) para conseguir la misma cantidad de alimento que obtendría sin tales dificultades en verano.

Para ganar peso, el ratón doméstico necesita un 50 por ciento más de alimento a 10 grados que a 23. Este es el costo adicional por termorregulación que hay que introducir en la ecuación bioenergética de la hembra. Por ser competitivos los factores que componen la ecuación, se registra un aumento en el tiempo necesario para alcanzar la pubertad. A 10 grados Celsius, las hembras del experimento necesitaban algunas semanas más para llegar a la primera ovulación, incluso con un exceso de alimento (hecho estudiado previamente de forma exhaustiva por S. A. Barnett, de la Universidad Nacional de Australia).

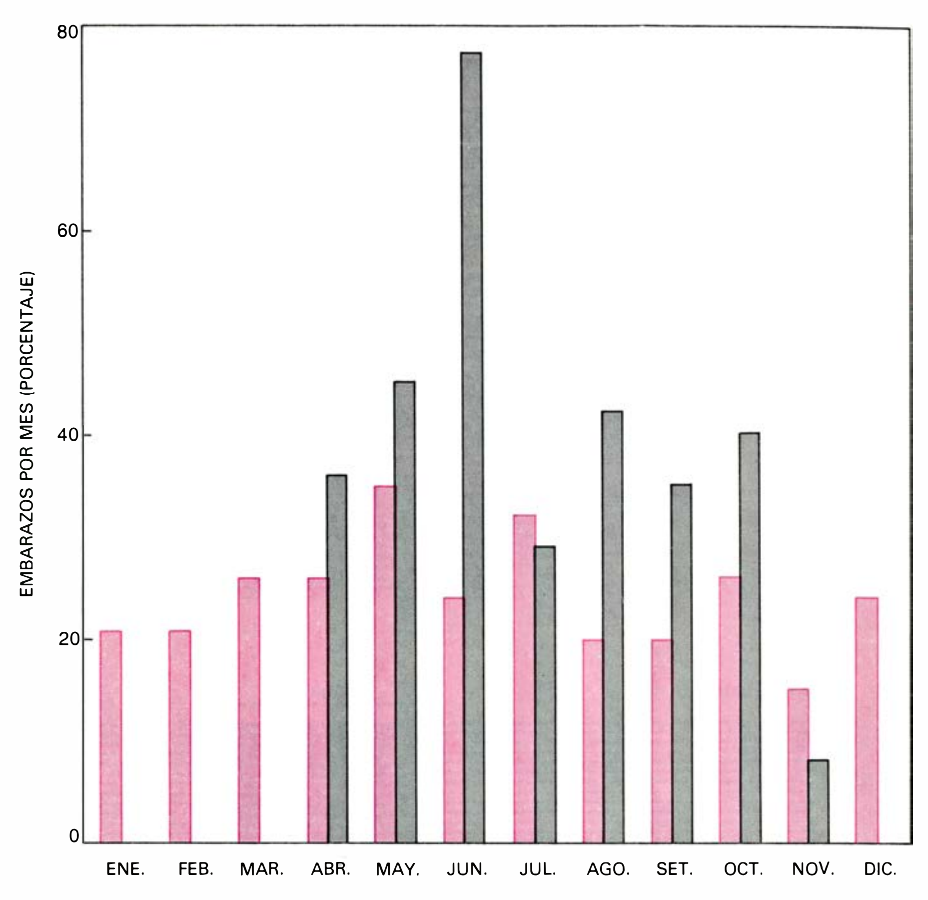
En tanto lograban hacerse con el alimento sin una búsqueda prolongada, viviendo a 10 grados, las hembras no alteraban su tasa de depósito de grasa ni se dañaba permanentemente su capacidad reproductora. No obstante, si se las obligaba a realizar una búsqueda más intensiva sin demasiadas probabilidades de volver a su madriguera (que les proporcionaba aislamiento térmico), se producía un desplazamiento total de la ecuación bioenergética hacia la termorregulación y en contra del crecimiento corporal, deposición de grasas y desarrollo reproductor. De hecho, al someter a nuestros jóvenes ejemplares a esas condiciones, se negaban a permanecer fuera de las madrigueras el tiempo requerido para obtener el alimento necesario para soportar temperaturas frías, incluso con la renuncia a todo vestigio de crecimiento y desarrollo reproductor.

Este experimento fue especialmente revelador por cuanto los ratones nos mostraron qué era y qué no era importante para su desarrollo reproductor. Una de las sorpresas que nos deparó el experimento fue la poca importancia relativa que tenía el gasto energético asociado a la locomoción al aumentar el tiempo de búsqueda.

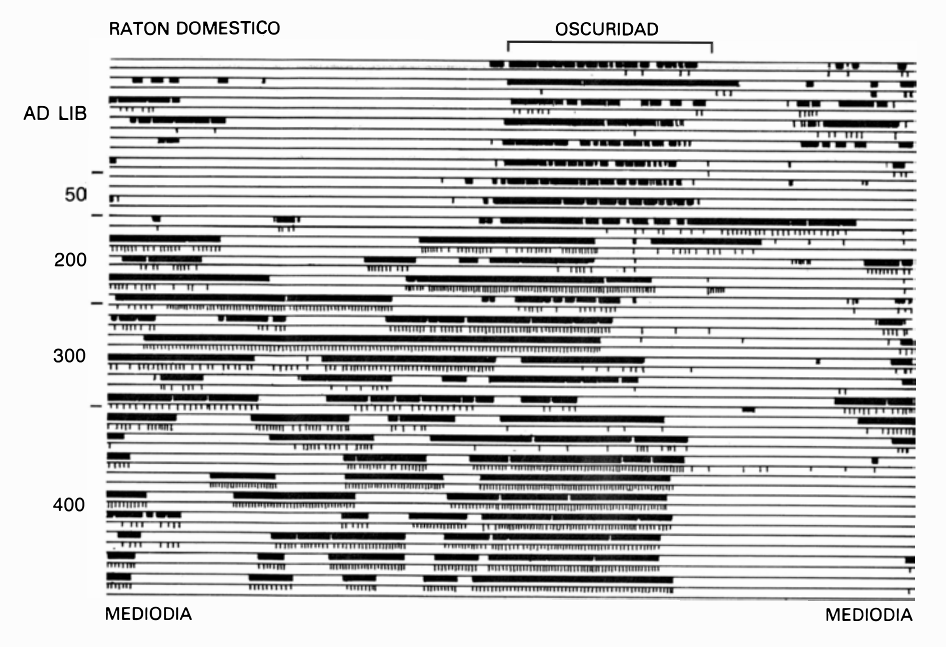
Incluso ofreciendo a los ratones alimento ilimitado, a 23 grados Celsius, daban cada noche de 20.000 a 30.000 vueltas. Ese esfuerzo equivale a una actividad espontánea de 9 a 15 kilómetros, distancia enorme para un animal de menos de 10 centímetros de longitud (sin contar el rabo). Un hombre de 70 kilogramos tendría que recorrer de 32.000 a 48.000 kilómetros diarios para igualar la distancia a la que un ratón de 20 gramos traslada su masa en el mismo período de tiempo. Evidentemente, el ratón doméstico está bien adaptado a soportar un costo locomotor casi ilimitado; y podría aumentar mucho su actividad cuando el alimento fuese escaso sin gasto energético apreciable en términos de crecimiento o desarrollo reproductor. La temperatura a la que debe efectuarse ese incremento de búsqueda resulta, no obstante, crucial.

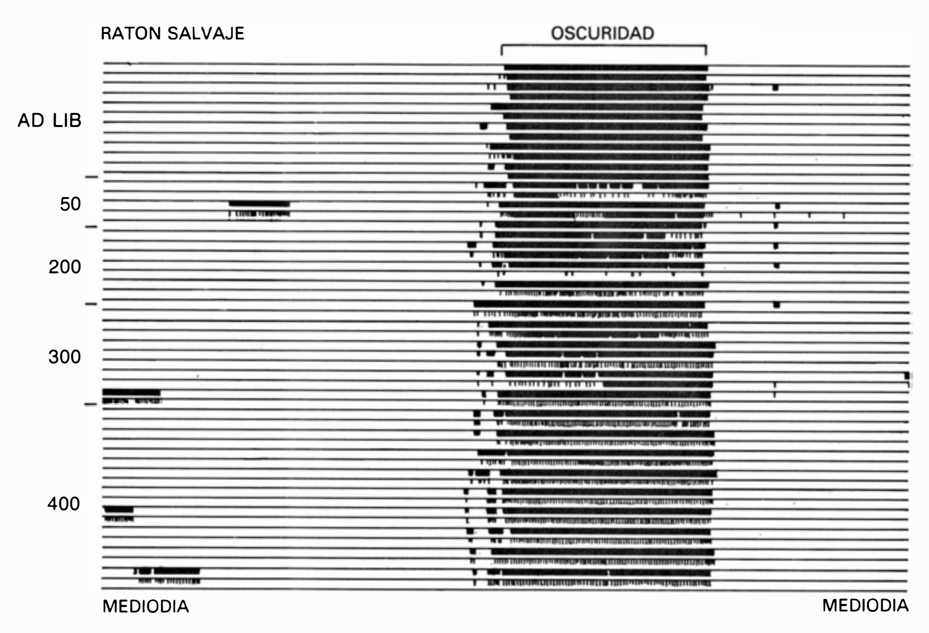
Este experimento y otros parecidos han reforzado nuestra conclusión de que el factor ecológico crítico que limita la cría en estas especies, tanto estacional como geográficamente, es el tiempo que el ratón debe emplear en la búsqueda de alimento expuesto a bajas temperaturas. El tamaño del animal y su incapacidad para almacenar una excesiva cantidad de grasa le coloca siempre en una precaria situación energética, incluso a temperaturas que el hombre encuentra suaves.

Si el factor regulador esencial en la reproducción del ratón doméstico es la



3. EFECTO DEL HABITAT sobre la procreación del ratón doméstico. Es muy destacado, según prueba la comparación entre ratones que viven en casas y dependencias humanas en Oxford, Inglaterra (*barras de color*), y ratones que viven en las marismas cercanas a la bahía de San Francisco (*gris*). Los ratones domésticos comensales, según los datos proporcionados por los ecólogos que los obtuvieron, se reproducen a lo largo de todo el año, mientras que los de marismas sólo lo hacen en estaciones determinadas.





4. ACTIVIDAD DIARIA de un ratón doméstico y de un ratón salvaje, registradas durante 27 días. Los ratones se mantuvieron ese tiempo (por separado) en la jaula de experimentación. Cada vuelta de la rueda giratoria y cada descarga del emisor de alimento accionaba la pluma del registrador. Se han colocado una debajo de otra todas las grabaciones correspondientes a los ciclos de 24 horas. Se aprecia así lo que los ratones, hembras en este caso, realizan en ese período. La línea superior de cada bloque revela la actividad locomotora del ratón durante el primer día; la segunda línea es la grabación del aporte alimenticio de ese mismo día; la grabación de los días sucesivos se presenta de forma similar. Los ratones recibieron comida sobrante los primeros días; posteriormente, se aumentaron las dificultades requeridas para que se hicieran con alimento, hasta llegar a 400 revoluciones por una ración de comida. En el medio natural el ratón se enfrentaría a una situación similar al avanzar las estaciones desde el verano hasta el invierno.

relación existente entre la disponibilidad de alimento, el tiempo de búsqueda y la temperatura ambiente, ¿qué adaptaciones han permitido al animal alcanzar tan amplio éxito colonizador? Hasta ahora se han descubierto dos armas que le ayudan en su continua batalla contra los caprichos de las fuentes alimentarias y de la temperatura ambiente. Una de ellas es que el ratón doméstico, a diferencia del resto de los micromamíferos, no es estrictamente nocturno. A menudo, el animal busca alimento durante el día, cuando la temperatura es más elevada. La segunda adaptación es que, una vez alcanzado el tamaño adulto y la pubertad, el ratón doméstico resiste bastante bien a las bajas temperaturas, siempre que haya alimento suficiente a mano. Hemos observado que si habituamos paulatinamente al ratón adulto a las bajas temperaturas y se le sitúa en un lugar seco con cantidad más que suficiente de algodón para construir su nido, y con el alimento a pocos centímetros del mismo, la mayoría puede reproducirse bien a temperaturas de hasta 6 grados Celsius bajo cero. También la mayoría de nuestros ratones criaron a 34 grados Celsius, sólo tres grados por debajo de la temperatura corporal. Es asombroso que una especie tan pequeña procree bien en una gama de temperaturas tan amplia.

Otra pista para entender el éxito colonizador del ratón doméstico nos la proporciona el examen del medio social del animal. La importancia de los estímulos sociales se ha descubierto en estudios de laboratorio; los biólogos de campo no la habían sospechado. Se ha visto que el ratón casero ha desarrollado un sistema muy complejo para regular su ovulación. Una de sus virtudes es la de su capacidad de retrasar la gestación hasta el final de los principales movimientos migratorios, y no iniciarla antes o durante dichos movimientos.

Al igual que en muchos otros mamíferos, depende en alto grado de pistas olorosas para ponerse en comunicación. Una fuente de esas señales la tenemos en la orina. Como demostró mi colega Claude Desjardins, siempre que el ratón casero (especialmente el macho) explora o rastrea, deposita por doquier pistas en el suelo. Las marcas contienen gran variedad de sustancias detectables por otros ratones. Un ratón puede determinar la especie, el sexo y el estado de excitación sexual de otro ratón mucho después de su paso.

Algunas de estas sustancias de la orina actúan como feromonas estimulantes, es decir, estimulan hormonalmente a otro animal en su actividad reproductora (o bien bloquean dicha actividad). Como se demostró en el laboratorio de John G. Vandenbergh, de la Universidad estatal de Carolina del Norte, el momento en que se produce la primera ovulación no es fijo. La presencia de un macho adulto adelanta la ovulación de una hembra joven; la presencia de otras hembras la retrasa. El efecto desencadenante de la presencia del macho se bloquea totalmente, en una hembra muy joven, ante la proximidad de otras hembras; más tarde, dicho efecto desencadenante supera fácilmente la presencia de otras hembras. Tales acciones pueden reproducirse en el laboratorio exponiendo periódicamente a los animales a una gota de orina del sexo apropiado, aunque esos rastros feromonales suelen actuar en conjunción con estímulos táctiles.

El sentido adaptativo del sistema del ratón para regular socialmente la primera ovulación parece residir en su relación con la dispersión. Tras el período de lactancia, los jóvenes ratones se alejan a menudo del área de nacimien-

to, recorriendo a veces largas distancias hasta encontrar un nuevo hogar. Es un viaje duro, con una baja probabilidad de supervivencia. La presencia de la madre y las hermanas impide la inseminación de la joven hembra por el padre antes de su dispersión. De esta manera se favorece la distancia hasta la que puede dispersarse la joven hembra.

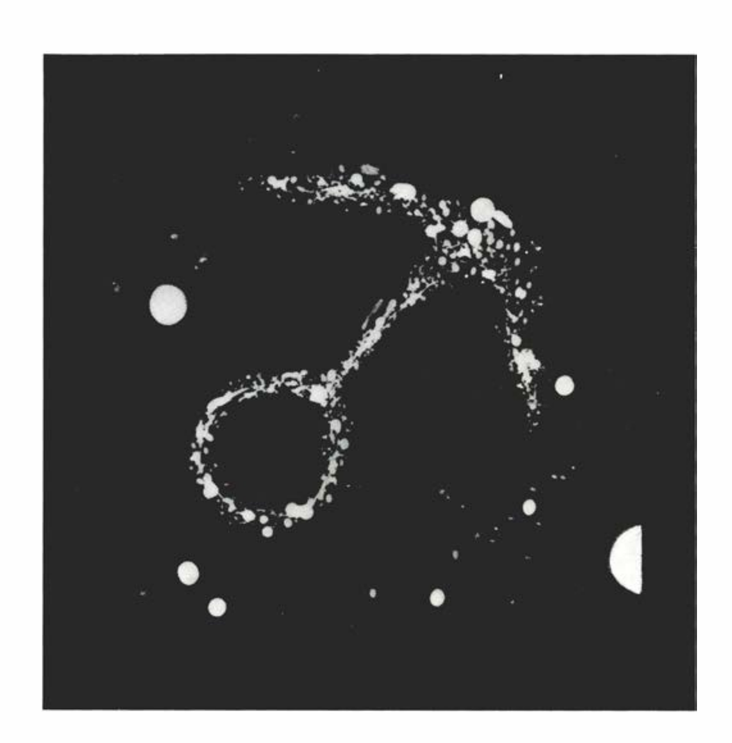
Durante su viaje de dispersión, las hembras se toparán seguramente con restos de orina de algún macho. Pero los encuentros fortuitos apenas inciden en el desarrollo sexual de una joven hembra, por la ausencia de estímulos táctiles del macho, que actúan sinérgicamente. Solamente cuando la hembra halla un nuevo hogar, cohabita con un macho y es estimulada por él, tanto por medio de feromonas como por el tacto, alcanza su plena maduración sexual.

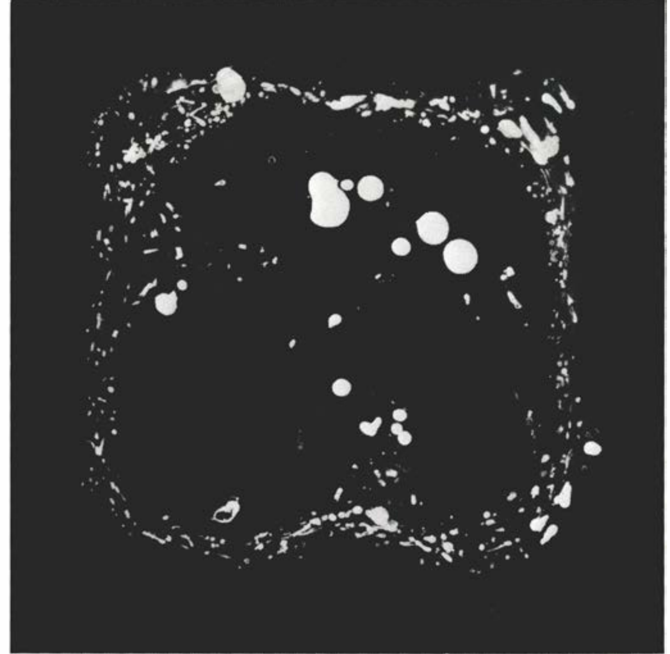
La flexibilidad reproductora que deriva de las reacciones específicas del ratón doméstico a los controles social, físico y alimentario probablemente no tenga paralelismo entre los mamíferos. La unión de esa flexibilidad con otras características del animal, como su capacidad para vivir en comensalismo con el hombre, da como resultado un proyecto de estrategia oportunista, y, a mayor escala, de colonización global.

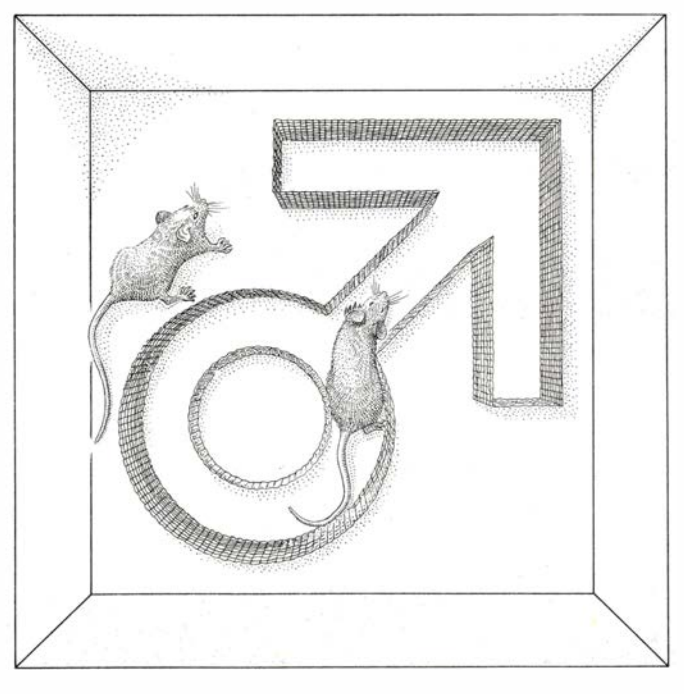
Se puede divisar la dimensión temporal de ese proyecto partiendo de una población comensal. Con las condiciones climáticas y dietéticas de la mayoría de las estructuras humanas, los ratones domésticos se reproducirían rápidamente a lo largo de todo el año, hasta la saturación poblacional específica de dichas estructuras. A partir de ahí, los jóvenes tendrían que dispersarse.

El hombre contribuye frecuentemente a la dispersión de los ratones. Una de las claves adaptativas reside en el metabolismo hídrico del ratón doméstico, parecido al de un roedor de zonas desérticas. Gracias a esa peculiaridad, medra en uno de los lugares más secos de la tierra: las casas, graneros y vehículos del hombre.

Un segundo factor adaptativo impor-







5. CIERTOS ESTIMULOS SOCIALES que condicionan el desarrollo reproductor del ratón doméstico hembra se encuentran en la orina de ambos sexos. El hábito de marcar el suelo con orina se estudió con el aparato descrito a la izquierda. Es una jaula, cuyo suelo se recubre de papel de filtro y con un área interior vallada (que forma el símbolo biológico del macho). Sobre esa ilustración se muestra una fotografía de un trozo de papel de filtro. La imagen se realizó con luz ultravioleta, que revela las manchas de orina depositadas por el animal. La fluorescencia de esa fotografía corresponde a la orina depositada por un macho encerrado en el área vallada durante 30 minutos mientras por fuera paseaba una hembra. La de la derecha muestra las manchas que produjo una hembra encerrada en el recinto cuando el macho quedaba fuera.

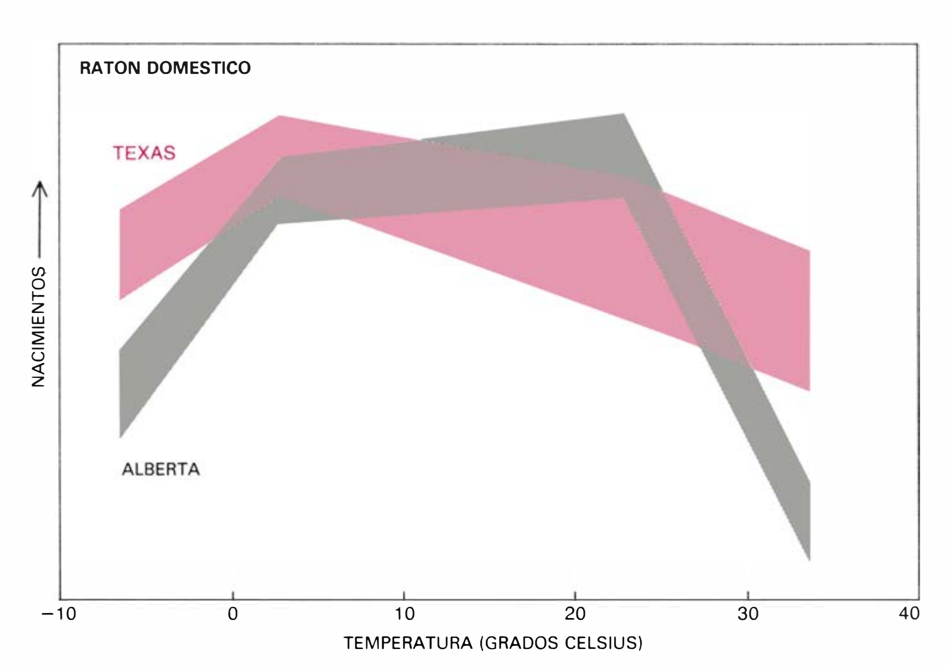
tante es la amplitud de los límites alimentarios de la especie. Los ratones domésticos sobreviven y se reproducen aprovechando una vasta gama de alimentos. Los granos de trigo constituyen una dieta particularmente adecuada, incluso a bajas temperaturas. Así, los ratones domésticos han llegado a todos los rincones del mundo, siguiendo, a menudo, la expansión del trigo y sacando siempre partido de la comida y el cobijo del hombre para reproducirse y fundar nuevas colonias allí donde se encuentre.

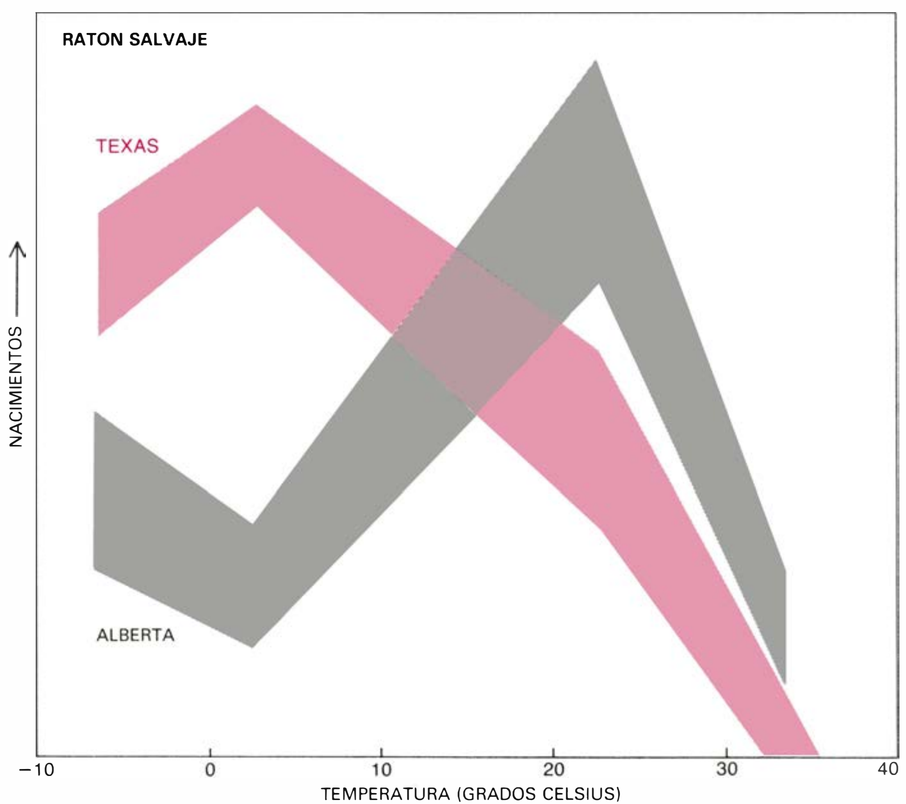
Cuando un ratón doméstico reinvade un hábitat natural, el carácter de los desafíos ambientales cambia drásticamente. La reproducción estacional suele depender entonces del desequilibrio energético de las hembras. El ratón doméstico se vuelve bastante nómada bajo esas condiciones, mucho más que la mayoría de los restantes micromamíferos. En la naturaleza, vaga más o menos constantemente buscando hallar un equilibrio entre temperatura y disponibilidad de alimento que resulte adecuado para la reproducción. El sistema de rastreo feromonal probablemente tenga gran importancia a la hora de decidir el momento de la cría.

Subyacente al éxito colonizador de estos animales se encuentra su alta fecundidad natural. Con una buena combinación de condiciones ambientales, las poblaciones de ratones domésticos pueden reproducirse rápidamente, alcanzando proporciones de plaga (en 1917 se cazaron, en una localidad australiana, más de 50 millones de ratones en cuatro meses). Todos los individuos de la progenie son dispersadores potenciales; a través de ellos, la especie se asegura continuamente la creación de nuevos hábitats. Muchos de esos intentos fracasan pero, gracias a las ventajas reproductoras, algunos logran fundar nuevas colonias. De esta manera la especie ha conseguido su amplia distribución mundial y la notable diversidad de hábitats que puebla.

Los buenos relatos biológicos nunca acaban del todo. Suelen plantear nuevas preguntas al tratar de responder las de partida. También nuestra investigación pone sobre el tapete nuevos interrogantes.

Vayamos con la primera: ¿cómo puede el ratón doméstico mantener su flexibilidad reproductora frente a la selección natural que opera en favor de la maximización de la eficacia bajo condiciones locales? Los micromamíferos autóctonos se caracterizan por permanecer en una región geográfica, en un tipo de hábitat; y la selección natural canaliza entonces sus controles reproductores hacia una adaptación a las demandas ambientales específicas de cada condición. Los micromamíferos típicos pueden reproducirse en un rango de temperatura limitado, y su reproducción pasa a depender de la limitación de alimento. A menudo, el animal se vincula al fotoperíodo; si es un micromamífero, se vuelve también estrictamente nocturno. Por el contrario, el éxito del colonizador requiere que el animal retenga su flexibilidad reproductora.





6. EFECTO DE LA TEMPERATURA en la procreación de ratones domésticos y salvajes procedentes de diferentes latitudes del continente norteamericano. Se estudiaron ratones de Texas (*color*) y Alberta (*gris*). Si al ratón salvaje se le proporciona comida suficiente, y se le obliga a procrear a diferentes temperaturas de laboratorio, muestra el efecto de una selección geográfica. Los ratones salvajes de Texas, que procrean en invierno, son insensibles a las bajas temperaturas y sensibles a las altas. Por el contrario, el ratón doméstico, mientras disponga de comida en abundancia en las proximidades de la madriguera, procrea a todas las temperaturas ensayadas, independientemente de cuál sea su región de procedencia.

¿Ha evitado el ratón casero la canalización de sus controles de reproducción por parte de la selección natural? Tal vez sí o tal vez no. Seguramente, como ha demostrado R. J. Berry, del University College de Lon-

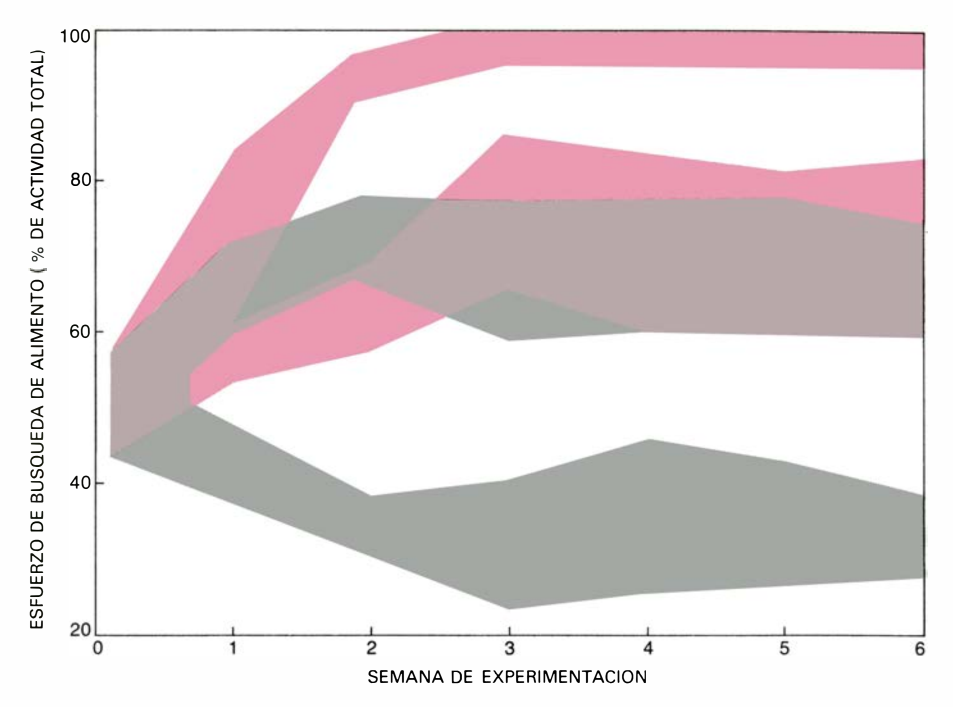
dres, muchos de los rasgos no sexuales de la especie son susceptibles de selección geográfica. Sin embargo, con respecto a los controles reproductores los colonizadores con éxito quizá procedan siempre de colonias que habitan en lugares protegidos del ambiente, nunca de poblaciones naturales; las poblaciones comensales del mundo actuarían así de fuente continua de animales genéticamente "promediados". Quizás ocurra de ese modo, pero en la mayoría de los casos los ratones comensales y no comensales son genéticamente similares; es más, suelen ser los mismos individuos nómadas. Por tanto, a lo mejor existe una base genética real para mantener la flexibilidad reproductora frente a la selección local.

Otro interrogante que abre este trabajo concierne al desajuste existente entre la capacidad reproductora y los controles alimentarios del ratón doméstico macho. ¿Constituyen las interacciones sociales entre machos el único control del éxito reproductor? Nada hay "gratuito" en la evolución, por lo que cabe preguntarse a qué renuncia el macho en la promoción de su eficacia reproductora que la hembra, más dependiente de la explotación de los recursos, ha conservado.

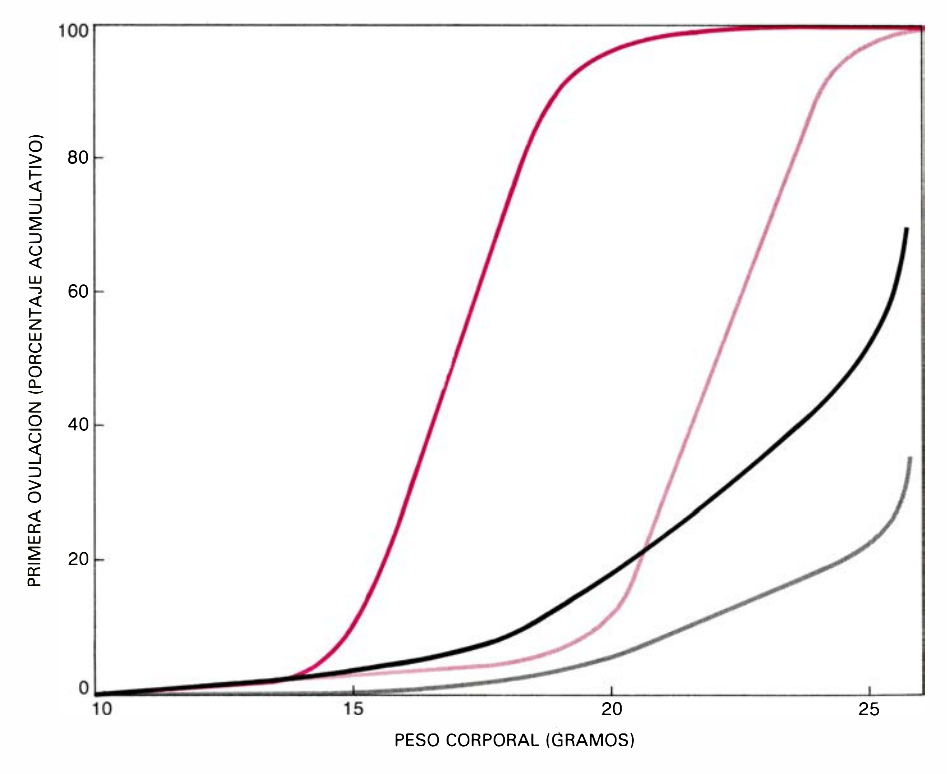
A una escala mayor, la sorprendente flexibilidad reproductora del ratón doméstico debe pagar algún tributo. Dicho de otro modo, si la forma de vida oportunista que lleva es tan beneficiosa, ¿por qué no la adoptan otras especies? Se desconoce qué ha debido pagar por mantener su estrategia.

Uno de los resultados finales de nuestro trabajo merece comentario. A lo largo del mismo hemos lamentado cuán poco se conoce del control ambiental sobre la reproducción de los mamíferos. Entre las principales dificultades en que nos debatíamos no era menor la de hallar una masa comparable de información ecológica y fisiológica relativa a otros mamíferos.

Todos los mamíferos están sujetos a regulación ambiental. El propio hombre ha de hacer frente a un control alimentario y emocional. Sin embargo, la moderna biología de la reproducción ha tendido a centrar su atención casi exclusivamente en los aspectos moleculares y tisulares de la reproducción, restringiéndose los modelos de sistemas a contados mamíferos domésticos. Quizás el estudio del ratón doméstico en estado salvaje lleve a un nuevo planteamiento del papel de la regulación ambiental y, en último término, a una visión más amplia de la reproducción de los mamíferos.



7. TEMPERATURA Y BUSQUEDA de comida son términos estrechamente relacionados. Cuando se exige que un ratón doméstico dé 100 revoluciones a la noria, a una temperatura de 23 grados Celsius, por una ración de comida, invierte sólo una pequeña fracción de su actividad diaria en la búsqueda de la misma (*trama gris inferior*). Si se le obliga a doblar ese esfuerzo (200 revoluciones) a esa misma temperatura (*trama gris superior*), o dar 100 revoluciones a 9 grados Celsius (*trama de color inferior*), dedica más tiempo a la actividad de búsqueda. Cuando son 200 las revoluciones que debe cumplir a 9 grados (*trama de color superior*), reduce su actividad total (no se ha indicado aquí) y se dedica exclusivamente a la búsqueda. En las dos primeras semanas del ensayo se adaptó lentamente los animales a la temperatura.



8. VARIACIONES DEL COMIENZO DE LA PUBERTAD en las hembras de ratón doméstico que se observan en algunas condiciones de convivencia. Las condiciones eran: una sola hembra emparejada con un solo macho (*color oscuro*), un grupo de hembras cohabitando con un solo macho (*color claro*), hembras aisladas (*negro*) y un grupo de hembras sin macho (*gris*). Las hembras jóvenes que cohabitan desde el final de la lactancia con un macho maduran rápidamente y tienen pronto su primera ovulación, mientras que la presencia de otras hembras retrasa la primera ovulación. El fenómeno representa uno de los componentes de la adaptabilidad reproductora del ratón doméstico. Las jóvenes suelen dispersarse por migración, con lo que el retraso de la primera ovulación provocado por la presencia de otras hembras evita la gestación antes o durante el traslado. Sólo cuando las hembras fundan un nuevo hogar y cohabitan con un macho alcanzan rápidamente la madurez sexual. Los dibujos son obra de Alan D. Iselin.

Florence Nightingale

Fundadora de la enfermería moderna, salvó la vida a miles de soldados durante la guerra de Crimea. Fue también pionera en el empleo de estadísticas sociales y en su representación gráfica

I. Bernard Cohen

En Florence Nightingale reconocemos una adelantada de la enfermería y reformadora de hospitales. Ella entendió su propia misión en términos más amplios: servir a la humanidad a través de la prevención de la enfermedad y la muerte innecesarias. Durante la mayor parte de su larga vida (1820-1910) se dedicó a dicha tarea con una firme determinación que prestó singular coherencia a todo lo que hizo. Indudablemente, sus mayores aportaciones estriban en sus esfuerzos por reformar el sistema de asistencia sanitaria del ejército británico, así como en el reconocimiento de la enfermería como una profesión respetable, conseguido mediante la institución de programas de formación y la definición de sólidos objetivos profesionales. Mucho de lo que hoy nos parece elemental dentro de la moderna asistencia sanitaria se originó a partir de las grandes batallas libradas por Nightingale en el siglo XIX. Mucho menos conocido, por ser un aspecto que han desdeñado sus biógrafos, es el empleo, igualmente pionero, de las novedosas técnicas de análisis estadístico en tales combates.

Nightingale aprendió por propia experiencia, como enfermera jefe durante la guerra de Crimea (1854-56), que podía lograrse un espectacular descenso de la tasa de mortalidad y salvar miles de vidas con sólo mejorar las condiciones higiénicas de los acuartelamientos y los hospitales militares. Su guerra particular consistió en convencer de ello a los mandos escépticos. En momentos en los que la recogida y análisis de estadísticas sociales no era tarea habitual, Nightingale supo advertir que la presentación de datos fiables sobre la incidencia de muertes evitables entre los soldados constituía un poderoso argumento a favor de la reforma. De este modo, además de propulsar la causa de la reforma médica, ayudó a cristalizar la revolucionaria noción de que los fenómenos sociales podían someterse a medición y análisis matemático.

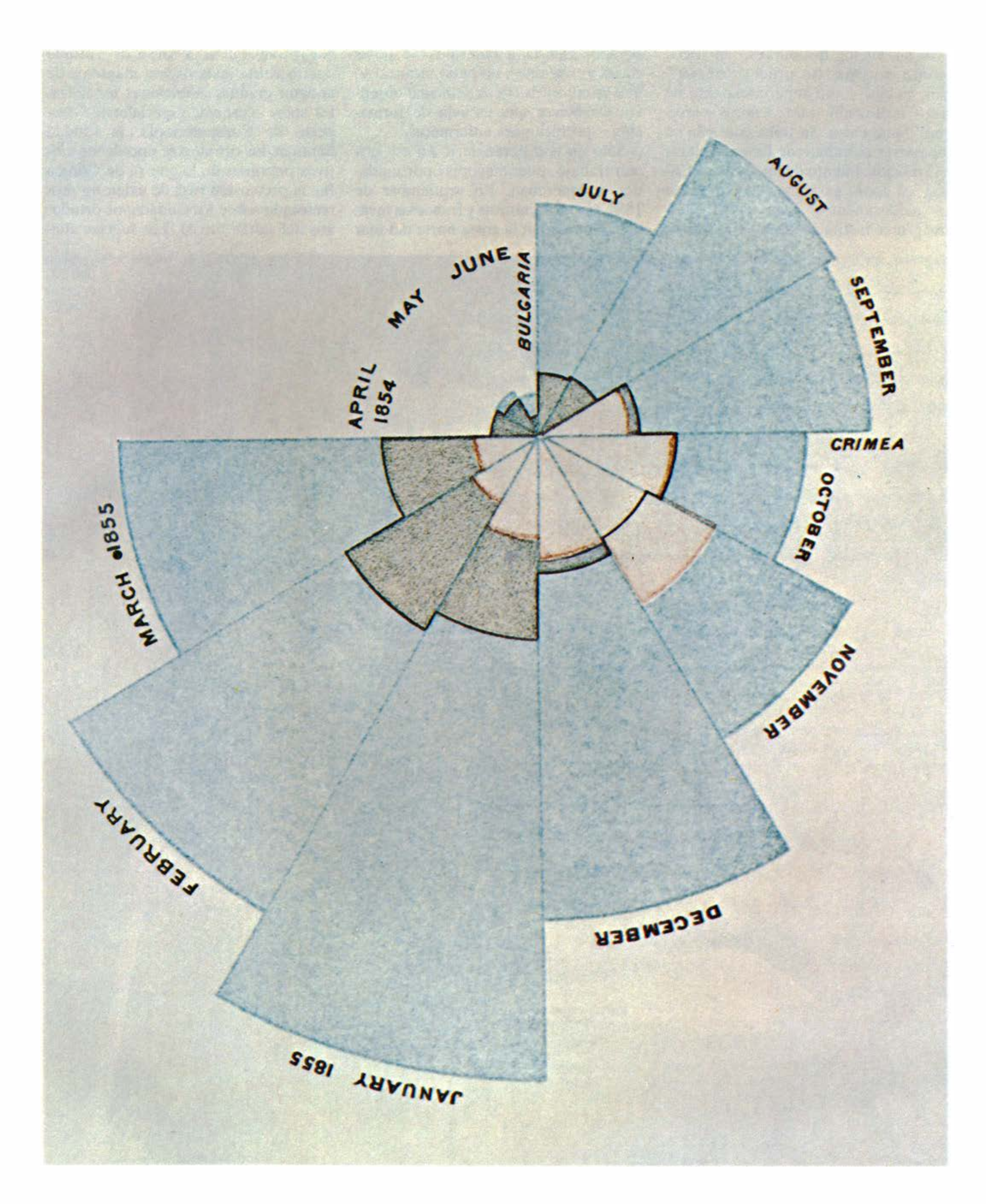
Los éxitos de Nightingale cobran mayor realce cuando se los valora dentro del ambiente de restricción social en que se desenvolvía la mujer en la Inglaterra victoriana. Su padre, William Edward Nightingale, fue un riquísimo terrateniente, cuya familia formaba parte de los círculos más selectos de la sociedad inglesa. En aquellos días, las mujeres de su clase ni acudían a la universidad ni ejercían carrera alguna; sus objetivos en la vida eran casarse y criar hijos. Nightingale tuvo suerte, pues su padre creía que las mujeres debían recibir una educación y él en persona le enseñó italiano, latín, griego, filosofía, historia e, incluso, escritura y matemáticas, lo que resultaba del todo extraño para las mujeres de su época. Cuando, recién cumplidos los veinte años, Nightingale hizo patente su interés por la enfermería, su padre se lo tomó tan en serio como para consultar a médicos sobre la conveniencia de la misma.

Si bien el aprendizaje profesional era un paso radical para una mujer de la clase social de Nightingale, dedicarse precisamente a enfermera parecía totalmente inimaginable incluso para su ilustrada familia. William Nightingale no sentía tanto "el componente físicamente desagradable de los hospitales", cuanto lo que parecía indicar de manera más que evidente el comportamiento disoluto de las enfermeras. Estas, por aquellos días, carecían de formación; casi siempre eran mujeres vulgares e ignorantes, dadas a la promiscuidad y a la bebida. Más adelante la propia Nightingale confió a su padre que había sido informada por la enfermera jefe de un hospital londinense de que "nunca había conocido una enfermera que no se emborrachara" y de que la mayoría de ellas "se conducen de modo inmoral" con los pacientes en las salas. No es de extrañar que sus padres esperaran que su hija olvidase su extraña ambición, se casara y sentara la cabeza.

Según todas las descripciones, Florence Nightingale fue una joven atractiva, de modo que su rechazo al matrimonio no provino de la falta de ofertas. Es cierto que una vez estuvo a punto de aceptar a un pretendiente, mas luego de un largo noviazgo terminó por conceder que ella nunca podría satisfacer su naturaleza "moral y activa" "pasando su vida formando pareja con él, haciendo vida social y ocupándose de los asuntos domésticos". En su diario escribió que el matrimonio convencional significaba "ser crucificada a una continuación y exageración" de su vida "presente", lo que supondría para ella algo "similar al suicidio". Ella decidió que Dios la había elegido para un destino diferente. Era una de aquellas a las que Él "había designado claramente... para permanecer soltera".

Cuando sus padres le impidieron enrolarse como enfermera, Nightingale se entregó a la religión en busca de consuelo, lo que iba a mantenerse como una fuerza dominante a todo lo largo de su vida. No obstante, sus sentimientos religiosos estaban centrados en la convicción de que la mejor manera de servir a Dios era a través del servicio a la humanidad. Así, en aquellos difíciles años de juventud, no renunció a su ambición de abrazar una carrera; leyó vorazmente sobre medicina y asistencia, ocupó parte de su tiempo en inspeccionar hospitales en Londres y trabajó privadamente con niños de los suburbios, a los que llamaba sus "granujillas de Westminster", sin lograr evitar todavía un sentimiento de frustración.

En 1851, por fin, Nightingale consiguió abandonar su hogar, pasando tres meses en un hospital y orfanato cerca de Düsseldorf, en Alemania, lugar regido por una orden de "diáconas" protestantes. Más tarde, pese a las protestas familiares, ocupó una plaza de aprendiz en otro hospital, éste regido por las Hermanas de la Caridad, en St. Germain, cerca de París. A la edad de 33 años empezaba, finalmente, el camino profesional que había elegido.



1. EL GRAFICO POLAR fue inventado por Florence Nightingale para reflejar con todo vigor la cantidad de muertes evitables ocurridas en los hospitales militares ingleses durante la guerra de Crimea (1854-56). Ella denominó "peinetas" (*coxcombs*) a dichas representaciones gráficas. El área de cada segmento coloreado, medida desde el centro, es proporcional a la entidad estadística representada. Los segmentos azules simbolizan las muertes acaecidas por enfermedades "zimóticas prevenibles o mitigables" (categoría introducida por Faro que incluía enfermedades contagiosas, como el cólera o el tifus, epidémicas y endémicas); las cuñas rosas, muertes por heridas, y las grises, muertes por otras causas. El punto más alto en la mortalidad ocurrida en los hospitales británicos tuvo lugar en enero de 1855, cuando fallecieron 3168 soldados; de ellos 2761 por enfermedades contagiosas, 83 a causa de sus heridas y 324 por otras causas. Basándose en que los efectivos medios durante aquel mes en Crimea habían sido de 32.393 hombres, Nightingale calculó una tasa anual de mortalidad de 1174 por 1000. El diagrama procede del libro de Nightingale *Notes on Matters Affecting the Health, Efficiency and Hospital Administration of the British Army* (1858); la mitad del diagrama, correspondiente al período entre abril de 1855 y marzo de 1856 no aparece representado.

A su vuelta a Londres, en 1853, pronto consiguió su primer "empleo" (sin sueldo) como superintendente de una "institución para señoras enfermas" londinense. Su tarea consistía en supervisar el trabajo de las enfermeras y el funcionamiento de los recursos físicos, así como garantizar la pureza de los medicamentos. Pese a conseguir crear una institución modélica en su tiempo, abierta a enfermos de todas clases y religiones, no pudo alcanzar lo que ya entonces era su principal objetivo: establecer una escuela de formación específica para enfermeras.

Sólo un año permaneció en ese primer trabajo, pues mayores oportunidades la esperaban. En septiembre de 1854, tropas británicas y francesas invadían Crimea, en la costa norte del mar Negro, apoyando la causa de Turquía contra Rusia (esta nación mantenía de antiguo grandes ambiciones territoriales sobre Turquía, especialmente respecto de Constantinopla, la Ciudad Santa de los ortodoxos; uno de los motivos próximos de la guerra de Crimea fue la pretensión rusa de exigir un protectorado sobre los ciudadanos ortodoxos del sultán turco). Las fuerzas alia-



2. FLORENCE NIGHTINGALE, en fotografía tomada en plena madurez. En ella reconoce la historia una adelantada de la enfermería y reformadora de hospitales. Desde su regreso de Crimea, en 1856, hasta su muerte a los 90 años, en 1910, vivió como una inválida, prácticamente recluida en su dormitorio. Su enfermedad, sin fundamento orgánico quizá, no consiguió evitar el ejercicio de su influencia a través de sus visitantes y copiosa correspondencia.

das consiguieron una rápida victoria en la batalla del río Alma, el veinte de septiembre, y comenzaron entonces el asedio a la base naval rusa de Sebastopol. La alegría de la opinión pública británica se convirtió pronto en pesar cuando el corresponsal de *The Times* en Crimea, William Howard Russell, informó que los soldados británicos enfermos o heridos se estaban muriendo sin recibir atención médica. No se trataba sólo de que apenas tuvieran cirujanos, ni siquiera de que apenas hubiera "lienzo para hacer vendas", sino que no existía una sola enfermera cualificada en el hospital militar inglés de Escutari, en las cercanías de Constantinopla. Los franceses, por su parte, habían enviado 50 Hermanas de la Caridad a Crimea.

Era una oportunidad de oro para la inquieta Nightingale. Inmediatamente escribió a su viejo amigo Sidney Herbert, ministro de Guerra, ofreciéndose como voluntaria. Después resultó que una carta del propio Herbert estaba ya en camino, solicitándole su colaboración para reclutar un cuerpo de enfermeras expertas y conducirlas a Escutari. Cuando Nightingale zarpó para Turquía, el 21 de octubre de 1854, acompañada por 38 enfermeras, llevaba el apoyo oficial del Gobierno (aunque no el del Ejército) y, tal vez más importante aún, el apoyo financiero privado, producto de una suscripción lanzada por *The Times*. Su trabajo en Crimea, aparte de convertirla en una heroína mundial, determinó su tarea para el resto de su vida.

Las condiciones que encontraron Nightingale y su grupo a la llegada a Escutari, el 5 de noviembre, día de la decisiva batalla de Inkerman, eran desastrosas. Los barracones del hospital estaban plagados de pulgas y ratas. Según el informe de una posterior comisión de investigación, bajo los edificios "existían fosas sépticas cargadas de suciedad... a través de las cuales el viento soplaba, empujando las emanaciones viciadas por los conductos de las numerosas letrinas abiertas hasta los pasillos y salas donde yacían los enfermos" en lechos de paja, en un estado de hacinamiento que empeoró tras el combate de Inkerman. Las sábanas de lienzo, según Nightingale, "eran tan ásperas que los heridos rogaban que se les permitiera continuar en sus mantones"; más aún, el trabajo de lavandería debía de hacerse en agua fría, resultando que muchas de las sábanas entregadas de vuelta como limpias estaban tan "llenas de piojos" que tenían que ser destruidas. Faltaban los suministros médicos y quirúrgicos básicos o quedaba bloqueada su distribución por la burocracia militar.

Tales eran las condiciones que aguardaban a los enfermos que llegaban, débiles y demacrados, sufriendo a causa de la disentería o por congelación además de sus heridas, luego de un lento viaje a través del mar Negro y el estrecho del Bósforo. Más bajas hubo en Escutari por epidemias de cólera y de tifus que por las propias heridas de guerra. En febrero de 1855 la tasa de mortalidad hospitalaria era del 42,7 por ciento de los casos tratados.

En sus esfuerzos por conseguir un hospital eficiente en Turquía, Nightingale mostró auténticas dotes de administradora. A cada momento, sin embargo, se veía entorpecida por las autoridades militares, que se resistían a imponer cambio alguno que pudiera aparentar que admitían sus propios errores o su incompetencia. Los militares no acababan de aceptar que la autoridad de Nightingale no se sometiera a las Fuerzas Armadas, dado su carácter civil y, todavía peor, su condición de mujer. En un comienzo, la hostilidad contra su empeño llegó hasta el punto de que se prohibiera que sus enfermeras entraran en los pabellones. Aun después de haber ganado mayor aceptación, tuvo que enfrentarse con mezquinos oficiales intermedios, como aquel de Intendencia que se negó a distribuir unas camisas reclamadas urgentemente de su almacén antes de que el cargamento completo, de 27.000 piezas, fue recontado por el inspector.

A pesar de esos impedimentos, Nightingale alcanzó importantes éxitos en Escutari gracias a su independencia jerárquica del ejército y, sobre todo, a su fuente privada de financiación. Estableció su propia lavandería, con agua caliente; instaló cocinas suplementarias para el hospital; se convirtió, en suma, en suministradora de todo el centro, "algo así como unos grandes almacenes de calcetines, camisas, tenedores y cuchillos, cucharas de palo, bañeras portátiles, verduras y hortalizas, mesas de operaciones, toallas y jabón, cepillos de dientes, despiojantes, tijeras, bacinillas y almohadas". El dinero para estos suministros y para pagar al personal reclutado provino no solamente de la suscripción de *The Times*, sino también de otros filántropos particulares y de su propio patrimonio.

Pese a desempeñar tan arduas tareas administrativas, Nightingale todavía encontró tiempo para dedicarlo personalmente a los enfermos, por las noches, en rondas interminables que dieron pie a la leyenda del "ángel de la guarda" de Crimea. Por la noche obligaba a todas las restantes mujeres a abandonar las salas (ya se había visto obligada a enviar de regreso a casa a algunas de sus ayudantes por su conducta desordenada); realizaba entonces su ronda "sola, con una lamparita en su mano", según relato del enviado de la suscripción de *The Times*, a través "de aquella teoría de enfermos postrados". Longfellow inmortalizó la imagen de "dama con lámpara" en su poema de 1857 ("Ah, en aquella hora miserable veo una dama con una lámpara"). La medida más significativa de los resultados obtenidos por Nightingale, la que ella misma señaló, fue, sin embargo, la disminución de la mortalidad: en la primavera de 1855, medio año después de su llegada a Escutari, había bajado del 42,7 al 2,2 por ciento.

Nightingale volvió a Inglaterra en julio de 1856, cuatro meses después del final de la contienda. En aquel momento, a la edad de 36 años, era una figura famosa y respetada en todo el mundo. No obstante, declinó todo tipo de honores públicos, afirmando que la mejor recompensa a sus servicios sería el nombramiento de una comisión para investigar el estado de la asistencia médica en el ejército. Y escribió: en Crimea, unos 9000 soldados reposaban "en tumbas olvidadas", muertos "por causas que pudieron prevenirse". La tragedia de las muertes innecesarias era constante en todos los acuartelamientos y hospitales militares, incluso en tiempos de paz. Tal situación sólo podía tener fin si se instituían dentro de los Servicios Médicos Militares las mismas reformas sanitarias que tantas vidas habían salvado en Escutari. A este objetivo se dedicó Nightingale.

¿Cómo podía convencer de la necesidad de la reforma? Descubrió que el argumento más convincente sería estadístico. Hoy es un lugar común el empleo de estadísticas para analizar condiciones sociales o la efectividad de una determinada política; pero no así en aquella época. La ciencia de la Estadística social estaba en mantillas. Al defender la causa de la reforma sanitaria, Nightingale se convirtió en promotora también de la nueva herramienta científica.

La estadística, entendida como la simple recolección de datos cuantitativos, tiene una larga historia, que se remonta al menos hasta el Libro de los Números del Antiguo Testamento, aunque el análisis de dichos datos surge con la revolución científica del siglo XVII. Los intentos iniciales de analizar datos relativos a fenómenos sociales se

vieron entorpecidos tanto por la limitación de los propios datos como de los medios matemáticos de análisis. En opinión de la historiadora de la estadística Helen M. Walker, la aparición de la estadística moderna en el siglo XIX posee una triple raíz: el desarrollo de la teoría matemática de las probabilidades, la aparición del estado moderno dotado de medios de recabar información sobre sus ciudadanos y sus actividades y el interés teórico de los economistas por conocer las causas de los comportamientos sociales. Estos "tres movimientos", en palabras de Walker, se fusionaron a mediados del siglo XIX en la carrera del astrónomo y estadístico belga Lambert-Adolphe-Jacques Quételet, en quien se reconoce al fundador de la moderna estadística social. En 1841 organizó Quételet la Oficina Central de Estadística de Bélgica, que se convirtió en modelo para instituciones similares en otros países, manteniéndose su liderazgo internacional en la investigación estadística hasta su muerte en 1874.

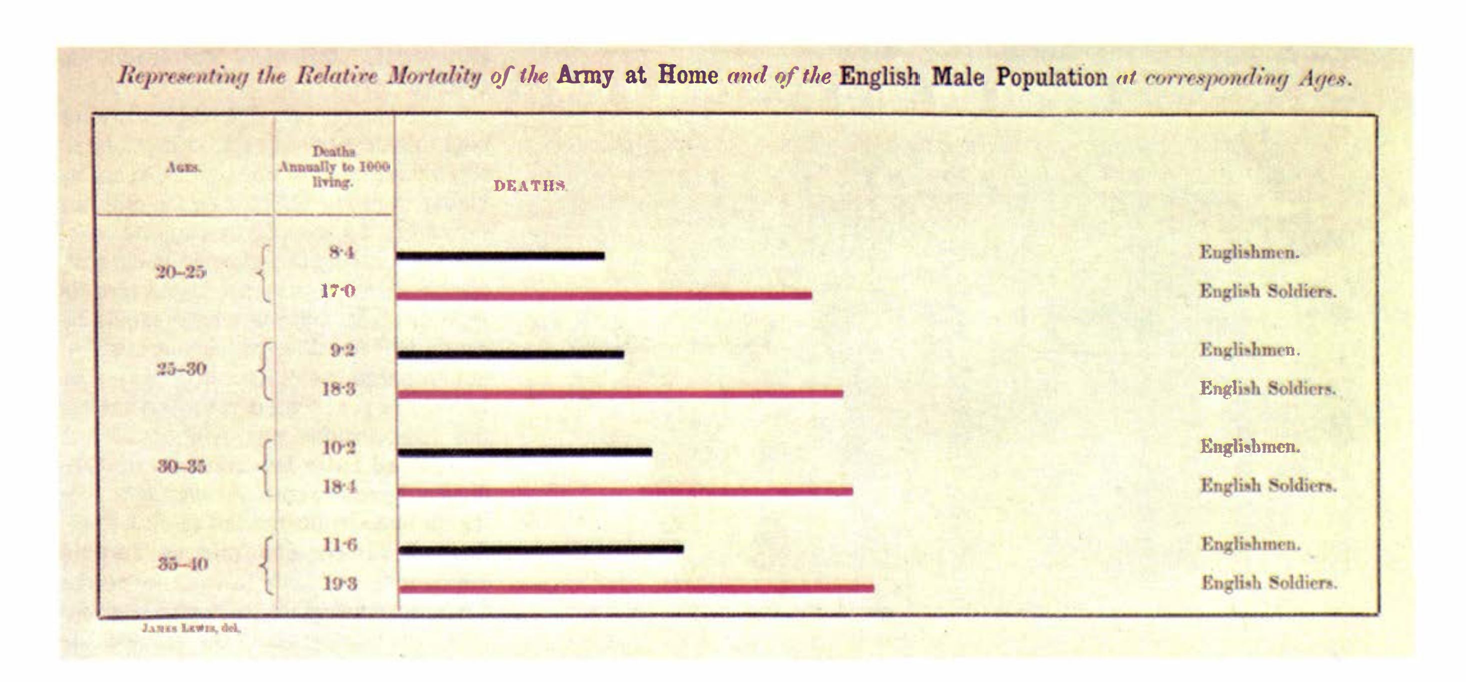
Los intelectuales decimonónicos que intentaron construir una ciencia del comportamiento social se enfrentaron a un dilema: en aquellos momentos, el modelo de las ciencias era la Física clásica, que describía los fenómenos naturales mediante leyes determinísticas, en tanto que el comportamiento humano parecía individual e indeterminado. Quételet resolvió el problema sustituyendo la cuestión de la individualidad con la creación del "hombre medio". De ese modo mostró que, aunque no existan leyes que determinen el comportamiento individual, hay regularidades en los atributos y comportamientos de los grupos, las cuales pueden caracterizarse matemáticamente por las leyes de la probabilidad. Quételet estaba convencido de que hasta los rasgos mentales y morales seguían las leyes de la distribución estadística, lo que se demostraría cuando pudieran medirse de manera apropiada.

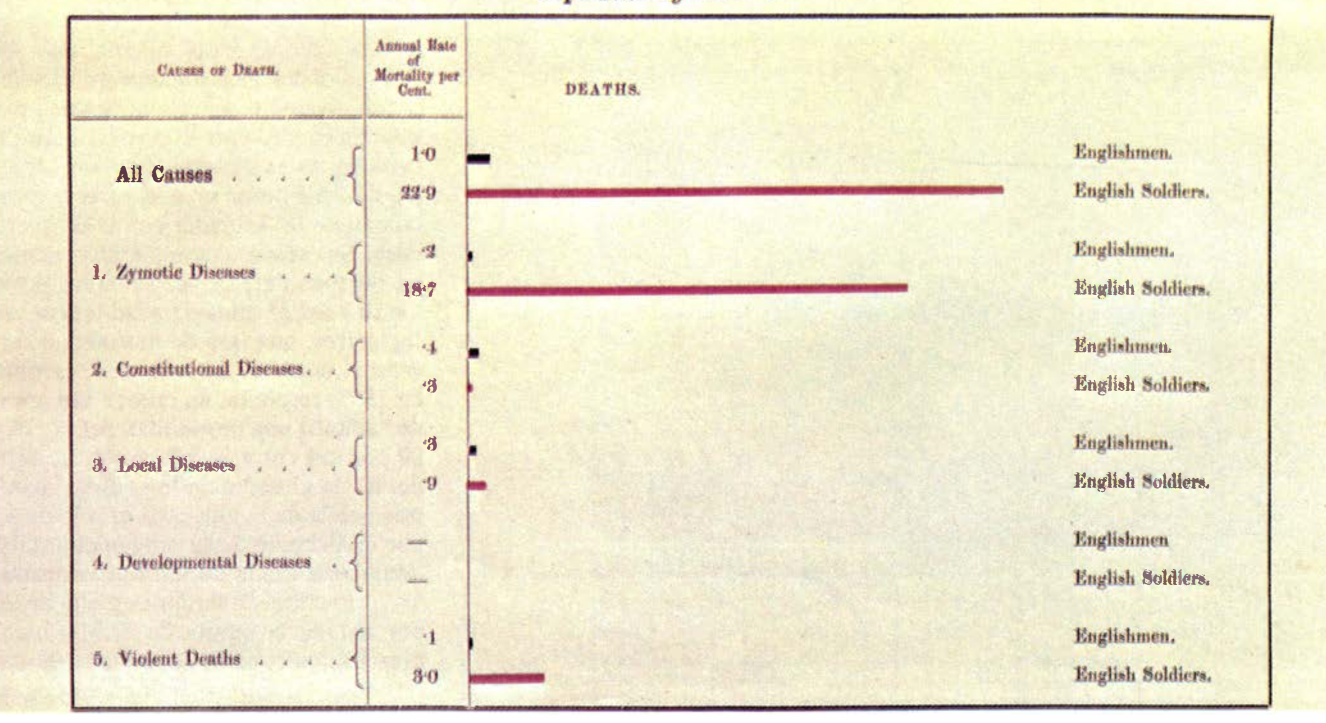
El trabajo más original y llamativo de Quételet fue el análisis de la influencia de factores como el sexo, la edad, la educación, el clima y la estación del año sobre el índice de criminalidad de Francia (1831). Los datos no permitían predecir qué individuo concreto cometería un crimen determinado; pero, según Quételet, mostraban determinadas regularidades que permitirían a un científico "enumerar por adelantado cuántos individuos mancharán sus manos con la sangre de sus semejantes, cuántos robarán, cuántos envenenarán". El descubrimiento de la constancia de tales factores condujo a Quételet a la radical conclusión de que "es la sociedad, en definitiva, quien, de algún modo, prepara dichos crímenes, mientras que el criminal es mero instrumento ejecutor".

Aunque el trabajo de Quételet fue muy apreciado por muchos intelectuales, otros lo rechazaron. El determinismo de su "Física Social" era anatema para personas adictas a las doctrinas en boga sobre el libre albedrío y la responsabilidad individual. John Stuart Mill, por ejemplo, escribió largamente contra las leyes de la probabilidad en general y contra su aplicación a las ciencias sociales en particular. Otro portavoz de la oposición al entendimiento estadístico del hombre en sociedad fue Charles Dickens. Su novela *Tiempos difíciles* iba dirigida a satirizar aquel tipo de personas, según el propio escritor contó después, que eran incapaces de entender nada más que de "números y proporciones", los "cabezas hueras" que utilizarían la temperatura anual media de Crimea "para decidir que los soldados debían ponerse pijamas de seda una noche en que podrían congelarse incluso envueltos en pieles". A Dickens le desagradaba el punto de vista estadístico porque pensaba que era deshumanizador, y en *Tiempos difíciles* describió las regularidades encontradas por los estadísticos en las tasas de locura, crimen, suicidio y prostitución en términos de "mortal reloj estadístico".

Nightingale, ardiente admiradora de la obra de Quételet, cultivó muy pronto su afición por la recogida y análisis de datos. En Escutari, además de las importantes reformas sanitarias acometidas, sistematizó las caóticas prácticas de recogida de datos que habían impedido, hasta entonces, conocer siquiera el número exacto de muertos. A su vuelta a Inglaterra, en 1856, conoció al médico y estadístico William Farr. Bajo su dirección, Nightingale pronto advirtió el valor potencial de las estadísticas que había recogido en Escutari, así como, en general, de toda la estadística médica como arma para la mejora de la

3. TASA DE MORTALIDAD en Escutari, el principal hospital británico durante la guerra de Crimea; disminuyó claramente tras la puesta en práctica de las medidas de saneamiento recomendadas por Florence Nightingale. Durante el invierno de 1854 a 1855, las tropas británicas que asediaban la fortaleza rusa de Sebastopol caían diezmadas por la malnutrición, el frío y las enfermedades (cólera, disentería, tifus y escorbuto). La tasa de mortalidad en Escutari que mostramos aquí, calculada por Nightingale sobre base anual y en forma de proporción sobre la población enferma, alcanzó el 415 por ciento en el mes de febrero. Las reformas sanitarias comenzaron en marzo. Este gráfico procede del informe de una Real Comisión organizada tras el conflicto bélico para investigar las condiciones sanitarias en el ejército.

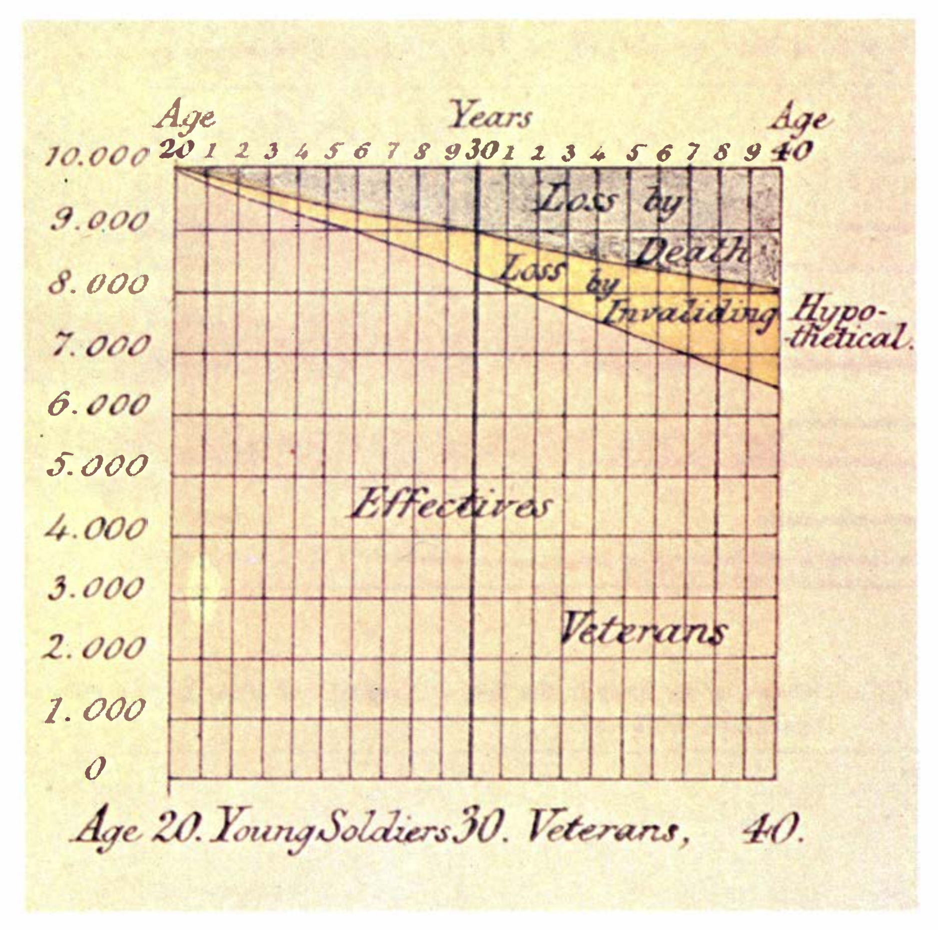


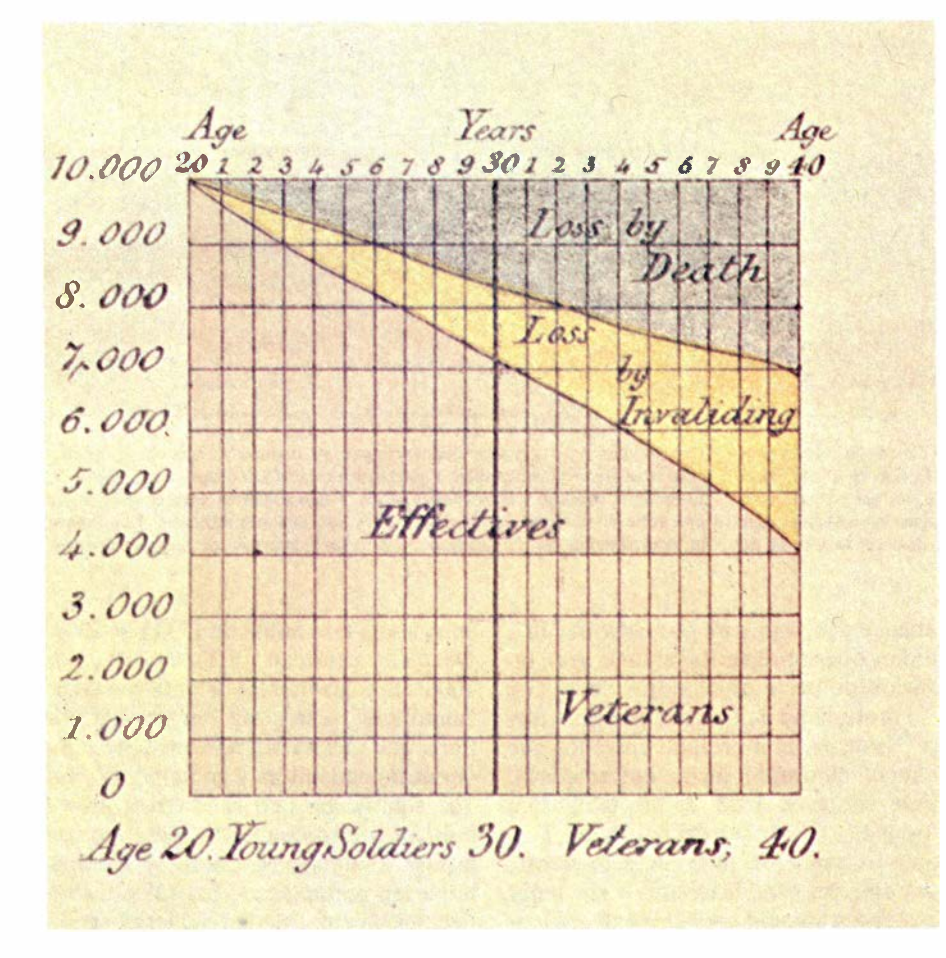


4. DIAGRAMAS LINEALES del informe de la Real Comisión, que sirven para comparar las condiciones en el ejército con las de la vida civil. Arriba se observa cómo la mortalidad del ejército en tiempos de paz era casi el doble que la registrada entre los civiles. Se muestra abajo que las enfermedades "zimóticas" supusieron la principal causa de muerte durante la guerra de Crimea, con mucha mayor incidencia que en Inglaterra. Las cifras del diagrama superior corresponden a porcentajes; las del inferior, tantos por mil. El informe condujo a la adopción de un código sanitario para el ejército y a una serie de medidas de reforma en las instalaciones militares. Ello ilustra la contribución de Nightingale a la representación de las estadísticas.

asistencia médica en los hospitales civiles o militares.

En toda la historia militar, hasta el siglo xx, la principal fuente de bajas en guerra fue la enfermedad más que las heridas recibidas en combate, sin que la guerra de Crimea fuera una excepción al respecto. Las cifras de Nightingale son elocuentes. Durante los primeros meses de la campaña existió "una mortalidad entre la tropa de 60 por ciento anual exclusivamente por *enfermedad*", índice que sobrepasaba el de la gran invasión de peste en Londres de 1665 y "la mortalidad de los atacados por cólera" (esto es, la mortalidd entre los que habían contraído dicha enfermedad). Para enero de 1855, la mortalidad en todos los hospitales británicos de Turquía y Crimea, medida respecto al total del ejército expedicionario y sin tener en cuenta los caídos en combate, se elevaba a una tasa anual de 1174 por 1000. De dicha cantidad, 1023 muertes por 1000 eran atribuibles a enfermedades "zimóticas" (categoría introducida por Farr, que incluía las enfermedades epidémicas, endémicas y contagiosas). Lo que significaba que si esa mortalidad hubiese persistido un año completo con la tasa medida para enero, y si no se hubiesen reemplazado los soldados fallecidos, la enfermedad hubiera barrido





el ejército británico destacado en Crimea.

Los diversos métodos empleados por Nightingale para calcular la mortalidad resaltaban tanto el impacto de la enfermedad como los efectos de las mejoras sanitarias. La tasa de mortalidad en el hospital de Escutari alcanzó la cifra increíble de 415 por ciento en febrero de 1855, medida sobre una base anual respecto del total de la población asistida. Sin embargo, en marzo, una vez se llevaron a la práctica las reformas sanitarias introducidas por Nightingale, la mortalidad entre los enfermos descendió vertiginosamente. Al acabar la guerra, la tasa de mortalidad entre los soldados británicos enfermos en Turquía era "apenas superior" a la de los soldados sanos en Inglaterra, según Nightingale; de modo aún más notable, la mortalidad entre todas las tropas destacadas en Crimea equivalía "sólo a las dos terceras partes de la medida entre nuestras tropas en la metrópoli".

Esta comparación sugería que los soldados estacionados en el solar patrio vivían en acuartelamientos insanos. En cuanto Farr le mostró el significado de las estadísticas de mortalidad, Nightingale pensó en comparar la mortalidad de los soldados con la de los civiles. Sus resultados mostraron cómo, en tiempos de paz, los soldados entre los 20 y los 35 años de edad tenían, en Inglaterra, una tasa de mortalidad cercana al doble de la civil. Así, escribió en 1857, resultaba un crimen tan grande "admitir una mortalidad del 17, 19 y 20 por mil entre la Infantería, la Artillería y la Guardia en Inglaterra, mientras que la de la vida civil es sólo de 11 por 1000, como llevar anualmente 1100 hombres al Llano de Salisbury y fusilarlos". (La cifra 1100 representaba un 20 por mil de la quinta de 55.000 hombres.) La necesidad de mejoras sanitarias en el ejército no se limitaba, pues, a los hospitales de campaña. Argumen-

5. PERDIDA DE EFECTIVOS HUMANOS que el exceso de muertes y enfermedades provocaba en el ejército británico, reflejada en estos gráficos del informe de la Real Comisión. Ambos parten del supuesto de que existe una recluta anual de 10.000 hombres de 20 años de edad y que la carrera de un soldado sano dura 20 años. Cada rectángulo equivale a 1000 hombres. En las condiciones antihigiénicas existentes en el momento (*gráfico inferior*), la fuerza total del ejército (*en beige*) disminuye un 29 por ciento, hasta 141.764 hombres, desde el máximo supuesto de 200.000, por causa de muerte (*en marrón*) y enfermedad (*en amarillo*). Si la mortalidad fuese igual a la de la población civil y se mantuviera idéntica la relación entre enfermos y fallecidos, los efectivos del ejército se elevarían de un modo significativo, según la conclusión del informe, hasta 166.910 hombres (*gráfico superior*).

tando con el apoyo de estas estadísticas, Nightingale llegó a despertar el interés de la reina Victoria y del príncipe Alberto, así como el del primer ministro lord Palmerston. La sugerencia de Nightingale de realizar una investigación formal sobre el estado de la asistencia médica en el ejército, pese a la resistencia pasiva del ministerio de la Guerra, se vio plasmada en mayo de 1857 con el nombramiento de una Real Comisión de Sanidad del Ejército.

Era absolutamente impensable para la época que una mujer formara parte de dicho comité; sin embargo, la influencia de Nightingale fue muy importante: algunos de sus miembros eran amigos suyos, como Sidney Herbert, el ministro que la envió a Crimea, y ella suministró buena parte de la información que manejó la comisión. Como reflejo de su propia opinión, escribió e imprimió a su costa un libro de 800 páginas titulado *Notas acerca de las cuestiones que afectan la salud, la eficacia y la administración de los hospitales del ejército británico*, que incluía una sección estadística ilustrada con gráficos. Farr la calificó como "la mejor obra existente" tanto sobre "representaciones estadísticas como sobre el ejército".

Nightingale fue una auténtica pionera de la representación gráfica de las estadísticas, que inventó los gráficos o diagramas polares, donde la muestra reseñada es proporcional al área de una cuña en un diagrama circular. Nightingale utilizó estos gráficos, a los que llamó sus "peinetas", en razón de sus vivos colores, para destacar hasta qué punto habrían podido evitarse las muertes ocurridas en Crimea. Las *Notas* impresionaron a Farr. Buena parte del trabajo de Nightingale se recogió en los gráficos y diagramas estadísticos que aquél preparó para el informe final de la Real Comisión. Nightingale, como parte de su "ataque de flanco" contra las fuerzas que se resistían a las innovaciones sanitarias, hizo imprimir, en folleto suelto, la parte estadística de dicho informe, que distribuyó profusamente entre el Parlamento, Gobierno y Ejército. Incluso hizo enmarcar algunas copias de determinados diagramas para comentarlos ante oficiales del Ministerio de Guerra y del Cuerpo Médico Militar.

Los esfuerzos de Nightingale no fueron vanos. Se establecieron cuatro subcomisiones para llevar a cabo las reformas recomendadas en su informe por la Real Comisión. La primera trataba sobre el cambio en el medio físico de los barracones y hospitales militares: reforma de la ventilación, calefacción, suministro de agua y tratamiento de las residuales y cocinas. Otras subcomisiones redactaron un código sanitario para el ejército, crearon una Escuela de Medicina Militar y reorganizaron los procedimientos militares de confección de estadísticas médicas.

A continuación Nightingale dedicó su atención a la salud de los soldados destinados en la India. Comenzó a estudiar con Farr los registros de enfermedad y mortalidad del ministerio de Asuntos Hindúes; envió cuestionarios requiriendo información sobre la situación sanitaria a los distintos asentamientos británicos en la India. Entre 1858 y 1859 presionó con éxito en el Parlamento para conseguir el nombramiento de una nueva Real Comisión que investigara la situación hindú. Dos años después envió a la comisión un informe analizando la encuesta remitida a los asentamientos en la India, de donde resultaba que las condiciones que estaban causando una mortalidad entre las tropas seis veces superior a la de los ciudadanos civiles en la metrópoli eran, entre otras, sistemas de alcantarillado defectuosos, hacinamiento en los barracones, falta de ejercicio y hospitales inapropiados. La comisión terminó su investigación en 1863. Luego de diez años de reforma sanitaria, Nightingale informó en 1873 que la mortalidad entre los soldados había descendido de 69 a 18 por 1000.

Como Nightingale demostró de manera tan eficaz, la estadística proporciona una manera organizada de aprender de la experiencia; la estadística médica serviría, pues, para mucho más que mostrar simplemente las muertes causadas por condiciones antihigiénicas. Estadísticas hospitalarias uniformes y exactas "permitirían demostrar matemáticamente el valor de determinados tratamientos u operaciones especiales", escribió; en suma, la estadística conduciría a una mejora de la práctica médica y quirúrgica. El único problema era que las estadísticas levantadas por los hospitales en tiempos de Nightingale carecían de uniformidad y de suficiente exactitud. Contra ello diseñó, ayudada por Farr y otros médicos, un Impreso Modelo de Estadística Hospitalaria, que recibió la sanción favorable del Congreso Internacional de Estadística celebrado en Londres en el verano de 1860.

El nuevo plan determinaba cuáles debían ser los datos elementales que debían recoger los hospitales: número de ingresados a principios y finales de cada año y número admitido durante el año, número de los que habían curado

o de los que habían sido dados de alta como incurables o por propia voluntad, número de enfermos fallecidos y duración media de la estancia hospitalaria. Este ambicioso plan, claramente avanzado para su tiempo, que reflejaba el ideal de la uniformidad estadística, nunca entró en vigor de modo generalizado. El mismo impreso ofrecido era extremadamente complejo, e incluía un sistema de clasificación de enfermedades diseñado por Farr con el que muchos médicos estaban en desacuerdo. Respecto al conjunto de las ciencias médicas, Nightingale no mostró el mismo olfato que le llevó a reconocer el valor de la estadística; por ejemplo, no se interesó en absoluto por la nueva teoría microbiana de la enfermedad ni por sus implicaciones para el tratamiento de las enfermedades contagiosas.

El empeño estadístico de Nightingale trascendía su afán por la reforma médica, estando estrechamente vinculado a sus convicciones religiosas. Para ella, las leyes que gobernaban los fenómenos sociales, "las leyes de nuestro progreso moral", eran las leyes divinas, reveladas a través de la estadística. Ella explicó que la ciencia de Quételet era algo "esencial para cualquier administración política y social", cuando los líderes políticos, en su mayoría, carecían de formación suficiente para la interpretación de estadísticas. En su opinión, el resultado de dicha ignorancia era una legislación que "no era progresista sino oscilante", redactada por funcionarios que "legislan sin saber lo que hacen". Por esta razón intentó representaciones gráficas, fácilmente comprensibles por cualquiera, y luchó por conseguir que se introdujera el estudio de la estadística en la enseñanza superior, aunque su sueño de una cátedra universitaria de la disciplina no se hizo realidad hasta después de su muerte. Ni siquiera hoy puede decirse que la sociedad haya comprendido plenamente la idea de Nightingale, como prueba el hecho de que la estadística no sea todavía asignatura obligatoria.

Las anotaciones hechas por Nightingale a su ejemplar del libro de Quételet *Física Social* evidencian, parcialmente, ese fervor religioso suyo respecto a la estadística. En la portada escribió una declaración de sus principios, englobando el título del libro:

El sentido del poder infinito
La garantía de la sólida certeza
La infinita visión de progreso
  a través de los principios de la
  FISICA SOCIAL
(estarían a nuestro alcance)
  sólo si fuese posible su aplicación
  en momentos
  en los que tanto se necesitan

Para Nightingale, Quételet fundó "la ciencia más importante del mundo", puesto que "la aplicación práctica de cualquier otra (ciencia) depende de ella". Si hemos de juzgar por su epistolario, el respeto debió ser mutuo entre ambos personajes.

Por su propio testimonio sabemos que, no obstante la importancia que cobraron los trabajos estadísticos para ella, durante esos años en que fue "un personaje influyente" ansió volver al ejercicio de la enfermería, la primera profesión que ella eligió, su primera "llamada de Dios". Sin embargo, su estado no se lo permitió, pues vivió como una inválida gran parte de su vida, desde que regresó de Crimea, postrada en cama prácticamente todo el tiempo.

Hay quien ha sugerido que no padeció enfermedad orgánica alguna, que su invalidez obedecía a un origen neurótico o incluso intencionado, aunque también pudo estar en relación con unas fiebres padecidas en Crimea. De cualquier modo, la reclusión en su dormitorio, donde recibía a un gran número de visitas, no mermó su influencia ni le impidió establecer los requisitos profesionales de la enfermera moderna. Con dinero de la Fundación Nightingale (cerca de 50.000 libras conseguidas a través de una suscripción abierta para honrar a la "Heroína del Pueblo") consiguió realizar uno de sus primeros objetivos: la Escuela de Formación Nightingale para Enfermeras en 1860. Aunque no pudo, como deseó, dirigir personalmente el centro, éste se rigió por los principios que ella misma estableció: "(1) Las enfermeras han de recibir formación técnica en hospitales especialmente preparados para ello; (2) las enfermeras habrán de residir en hogares dispuestos para velar por su moralidad e inculcarles disciplina".

Se trataba, en ambos casos, de principios radicales para su tiempo. El que ambos sean aceptados hoy en día como cosa corriente testimonia el servicio prestado por Florence Nightingale a la enfermería, que contribuyó tanto como cualquier otro adelanto científico a elevar la calidad de la asistencia médica. Teniendo en cuenta la otra pasión de su vida, nos parece apropiado utilizar un indicador estadístico para reflejar dicha contribución: el censo británico de 1861 señalaba la existencia de 27.618 enfermeras, encuadrando dicha ocupación entre las "Domésticas"; en 1901, su número ascendía a 64.214, recogiéndose bajo el epígrafe "Medicina".

Juegos de ordenador

El autómata celular ofrece un modelo del mundo y es un mundo por sí mismo

Brian Hayes

Hay sin duda motivos para admirar cómo las moléculas de agua "saben" ensamblarse y componer las complejas formas de simetría que muestran los copos de nieve. Ningún arquitecto dirige la construcción; tampoco están las moléculas provistas de plantillas de la figura cristalina. A escala macroscópica, la configuración y la estructura resultantes emergen exclusivamente en razón de las interacciones microscópicas de muchas unidades idénticas. Cada molécula responde tan sólo a la influencia de sus vecinas más cercanas; no obstante, llega a manifestarse una organización coherente que se extiende por toda la estructura, compuesta, tal vez, por 10^{20} moléculas.

Para ayudarnos a comprender este proceso, pudiera sernos útil imaginar que cada uno de los emplazamientos donde han de irse encajando las moléculas está gobernado por un rudimentario ordenador. Conforme el cristal va creciendo, cada ordenador examina los emplazamientos de su entorno y, en función de sus hallazgos, determina, ajustándose a una regla fija, si su propio lugar habrá de quedar ocupado o vacante. Idéntico cálculo se realiza en todos los emplazamientos, obedeciendo siempre a la misma regla.

El modelo computacional del copo de nieve es un autómata celular, a saber, una formación uniforme de muchas casillas idénticas, donde cada una tiene solamente unos cuantos estados posibles, e interactúa tan sólo con unas cuantas celdillas de su vecindad. Los componentes del sistema –las celdillas, más la regla para determinar el estado siguiente de cada una– pueden ser, en realidad, muy sencillas; ello no obsta para que la evolución que se genera pueda alcanzar enorme complejidad.

La noción de autómata celular tiene aproximadamente la edad del ordenador electrónico digital. Las primeras investigaciones en este campo las emprendió John von Neumann (con importante contribución de Stanislaw Ulam) a comienzos del decenio de 1950. La ambición fundamental de von Neumann era idear un sistema sencillo capaz de reproducirse por sí mismo, a imitación de los seres vivos. El más conocido de los autómatas celulares, el "juego de la vida", inventado por John Horton Conway en 1970, presenta también un aspecto biológico, como su nombre sugiere. Sus células nacen, viven o fallecen, de acuerdo con la densidad local de la población.

Los trabajos más recientes sobre autómatas celulares han cargado el acento en otros aspectos. Se considera hoy que mediante formaciones de casillas, provistas de reglas de interacción local, podrán obtenerse modelos potencialmente útiles de sistemas físicos, que van desde el estudio de los copos de nieve hasta el comportamiento de las galaxias, pasando por el ferromagnetismo. Pueden ser útiles también en informática, tanto por su carácter práctico (¿cómo organizar una red de muchos ordenadores en interacción mutua?) como teórico (¿cuál es el último y definitivo límite de la capacidad de cómputo que pueden tener las máquinas?). Quizá más intrigante aún sea que el autómata celular puede considerarse a modo de "universo digital", digno de ser explorado por su interés intrínseco, con total independencia de su utilidad en tanto que modelo del mundo real.

El renovado interés que han suscitado los autómatas celulares quedó concretado en un seminario que sobre esta materia se celebró hace un año en el Laboratorio Nacional de Los Alamos. Las colaboraciones (unos veinte artículos) han aparecido en *Physica D* y, recogidas en un libro, las ha editado North-Holland Publishing Company. Casi todo cuanto aquí se refiere se inspira en los trabajos de la reunión de Los Alamos.

Cuatro son las propiedades que caracterizan a los autómatas celulares. La primera es la organización geométrica de la formación, o matriz, celular. Para dar modelos del crecimiento de los copos de nieve podría ser apropiada una red hexagonal en el plano; sin embargo, en casi todos los contextos se opta por un retículo ortogonal, formado por cuadrículas idénticas. Aunque la construcción de formaciones de tres o más dimensiones no ofrece dificultad conceptual, no resultan fáciles de visualizar. Ultimamente se han logrado descubrimientos sorprendentes con la más sencilla formación unidimensional: una pura y simple hilera de casillas.

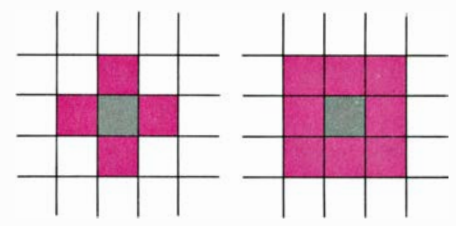
En el interior de cada matriz o formación celular debemos especificar el vecindario o entorno que cada célula ha de examinar para concluir cuál será su siguiente estado. Hay en el reticulado ortogonal plano dos tipos de vecindad que han merecido gran atención. Von Neumann confinó la atención de cada célula a sus cuatro vecinas más inmediatas, las situadas al norte, sur, este y oeste de ella; este conjunto de células es hoy conocido por entorno de von Neumann. El entorno formado por estas cuatro células, más las cuatro diagonalmente adyacentes a la central, ha sido bautizado entorno de Moore, en honor de Edward F. Moore. Evidentemente, los entornos pueden interceptarse y superponerse parcialmente unos a otros, por lo que una misma célula pertenece a un mismo tiempo a los entornos de varias otras, adyacentes a ella. En ciertos casos, la célula central, es decir, la célula que está realizando el cálculo, se considera también miembro de su propio entorno.

El tercer factor a considerar en la descripción de un autómata celular es el número de estados que cada célula puede adoptar. Von Neumann descubrió una configuración capaz de autoreproducirse, formada por células con 29 posibles estados; pero la mayoría de los autómatas estudiados son mucho más sencillos. Hay verdaderamente campo suficiente de variación incluso limitándonos a los autómatas binarios,

1. El "juego de la vida", en plena evolución sobre la pantalla de la máquina de autómatas celulares de Toffoli



2. Formación de dendritas creadas por un autómata celular con regla de transición asimétrica



3. Los entornos de von Neumann y de Moore

cuyas células pueden encontrarse tan sólo en dos estados distintos, habitualmente representados por 1 y 0, verdadero y falso, o viva y muerta.

La razón fundamental de la variedad y riqueza de formas del universo de los autómatas celulares es el inmenso número de posibles reglas para determinar el futuro estado de una célula a partir de la configuración actual de su entorno. Si el número de estados posibles de la célula es k, y si n es el número de células que componen el entorno, hay k^{k^n} posibles reglas. Así pues, para un autómata binario con entornos de von Neumann (donde n es igual a 4) hay más de 65.000 posibles reglas de transición; con entorno de Moore ($n = 8$) hay 10^{77}. Tan sólo una minúscula porción de ellas se han examinado.

El juego de la vida se desarrolla con células biestables, sobre un retículo ortogonal y con vecindades de Moore, con la complicación adicional de que también es importante el estado en que se encuentre la casilla central. Dicho de otra forma, en cada etapa de la evolución del sistema, cada celdilla examina el estado en que se encuentran las ocho casillas circundantes, y consulta también su propio estado. De acuerdo con la regla definida por Conway, si la casilla central está viva, continuará viviendo en la generación siguiente en el caso de que al menos dos, y no más de tres, de las ocho celdillas de su entorno se encuentren vivas también. Si en el entorno hay tres casillas vivas, la casilla estará viva en la generación siguiente, sea cual fuere su estado actual. En cualquier otra circunstancia, la célula, o bien muere, o bien permanece muerta.

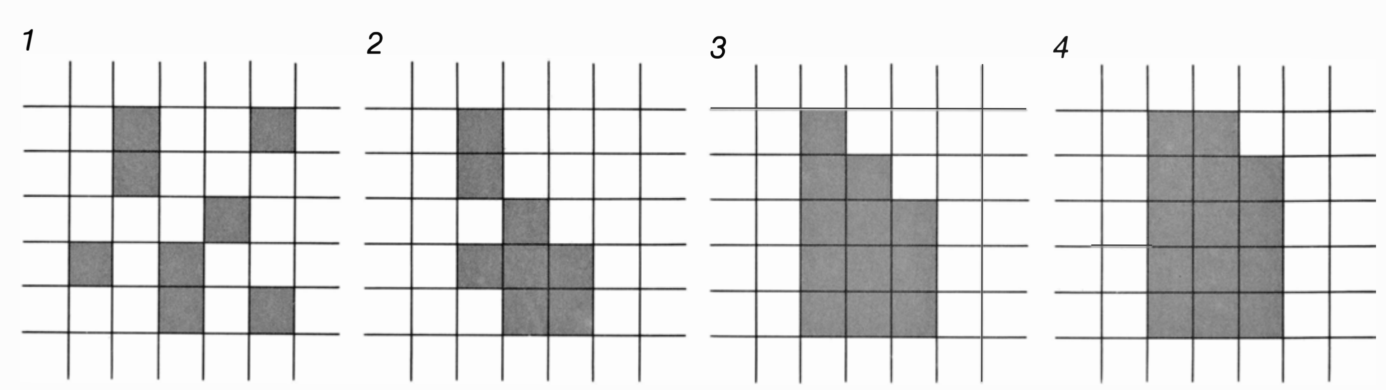
Lo que hace fascinante al juego de la vida es el carácter impredictible de su evolución. Hay formaciones iniciales que se extinguen por completo; otras muchas quedan atrapadas en configuraciones estables, o en configuraciones cíclicas cuyo período es de unas pocas generaciones. A lo largo de los años, empero, se han ido descubriendo cierto número de estados iniciales más interesantes, como el del "cañón lanzadeslizadores" que va disparando una ráfaga sin fin de proyectiles. La exploración de los recovecos y senderos del juego de la vida continúa; se describen algunos desarrollos recientes en *Wheels, Life, and Other Mathematical Amusements*, de Martin Gardner (cuya traducción, en prensa, ha preparado la Editorial Labor). Aquí, sin embargo, me gustaría prestar atención a otros autómatas celulares, cuyas propiedades están apenas comenzando a elucidarse.

De entre la miríada de posibles reglas de transición, muchas no ofrecen mayor interés. Por ejemplo, una regla que estipulase que una celdilla habrá de encontrarse en estado activo si y solamente si se halla activa la situada a su izquierda, determinaría una evolución muy sencilla de predecir: la forma de toda configuración inicial se mantiene, pero la configuración va desplazándose hacia la derecha a razón de una casilla por unidad de tiempo. Una subclase de reglas, las llamadas "reglas de recuento", o "reglas totalísticas", contienen, al parecer, especímenes de casi todas las variedades observadas de autómatas celulares. Con reglas de esta naturaleza, el nuevo estado de una célula depende tan sólo del número de vecinas que se encuentren en un estado dado, y no de su posición respecto a la central. Muchos autómatas fundados en tales reglas han sido estudiados por miembros del Information Mechanics Group, del Laboratorio de Informática y Computación del Instituto de Tecnología de Massachusetts. Componen el grupo Edward Fredkin, Norman Margolus, Tommaso Toffoli y Gérard Y. Vichniac.

Una de las más sencillas reglas de recuento es la de paridad, que asigna a las casillas valor 1 si hay un número impar de células vecinas en estado 1, y valor 0 en caso contrario. De la evolución de este sistema al aplicar la regla en el entorno de von Neumann nos ocupábamos en esta misma sección el pasado diciembre. Toda formación inicial queda reproducida cuatro veces; las cuatro copias se cuadruplican a su vez, y así sucesivamente.

Las reglas "de votación" son otro tipo de reglas totalísticas, que se caracterizan por asignar a la casilla central el valor 1 cuando el número de casillas con 1 del entorno rebasa cierto valor umbral. En un artículo presentado en el seminario de Los Alamos, Vichniac hace notar que este tipo de reglas engendra modelos de nucleación y modelos de percolación, que son fenómenos importantes en la física del estado sólido y en otros campos. El término "percolación" describe la formación de caminos conexos a través de cierto espacio; por ejemplo, al dispersar un metal en una matriz aislante, la conductividad del conglomerado depende de que lleguen a formarse cadenas continuas de átomos del metal. Análogamente, la transmisión de enfermedades infecciosas sólo es posible por intermedio de una cadena ininterrumpida de individuos sensibles a ella. La nucleación es el proceso que inicia el crecimiento de cristales, la ebullición de líquidos y acontecimientos similares.

Una de las reglas de transición que origina percolación es la que asigna a la casilla central el valor 1 si y solamente si hay 1 en al menos tres de las cinco

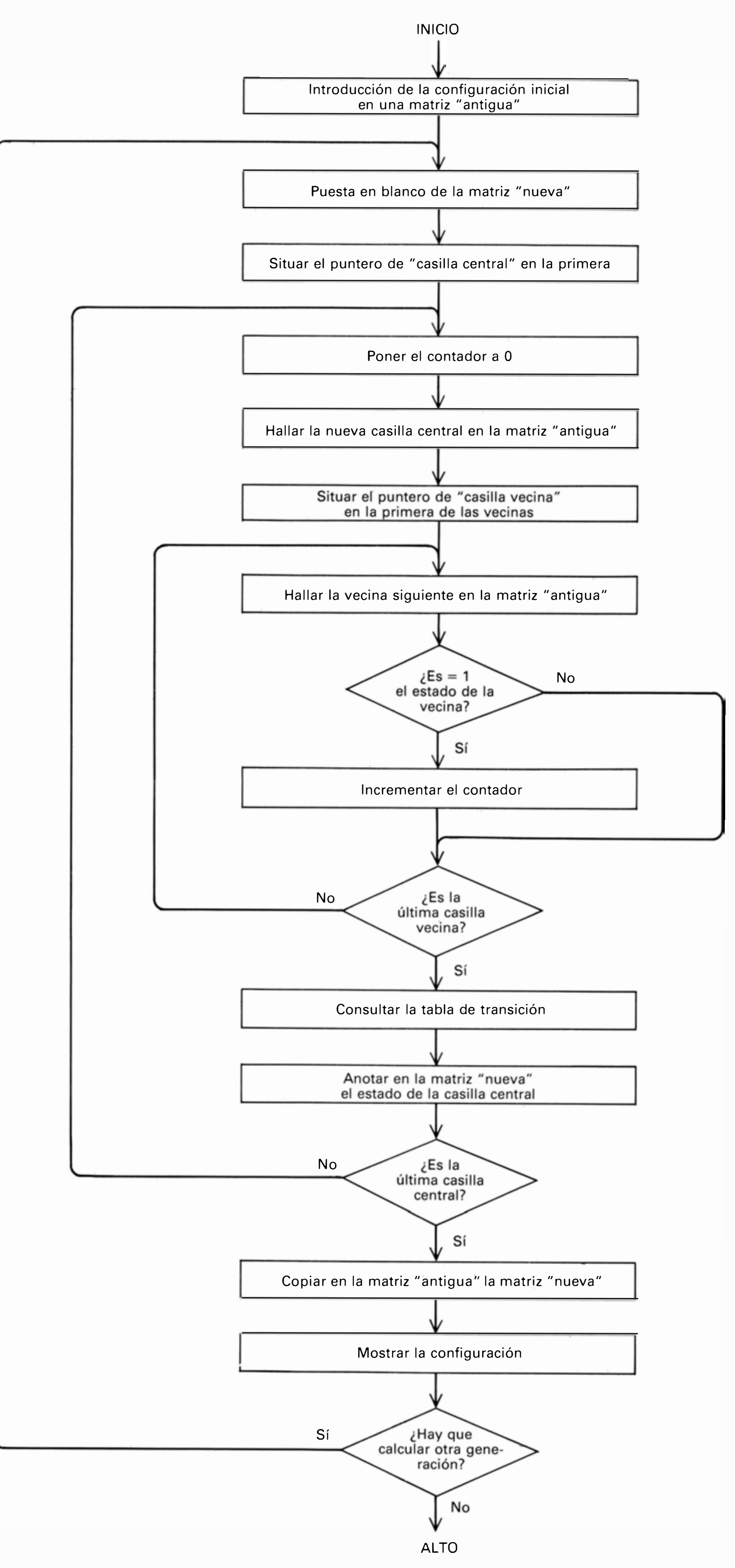


4. Evolución de un autómata celular con la regla de votación "dos de cada cinco"

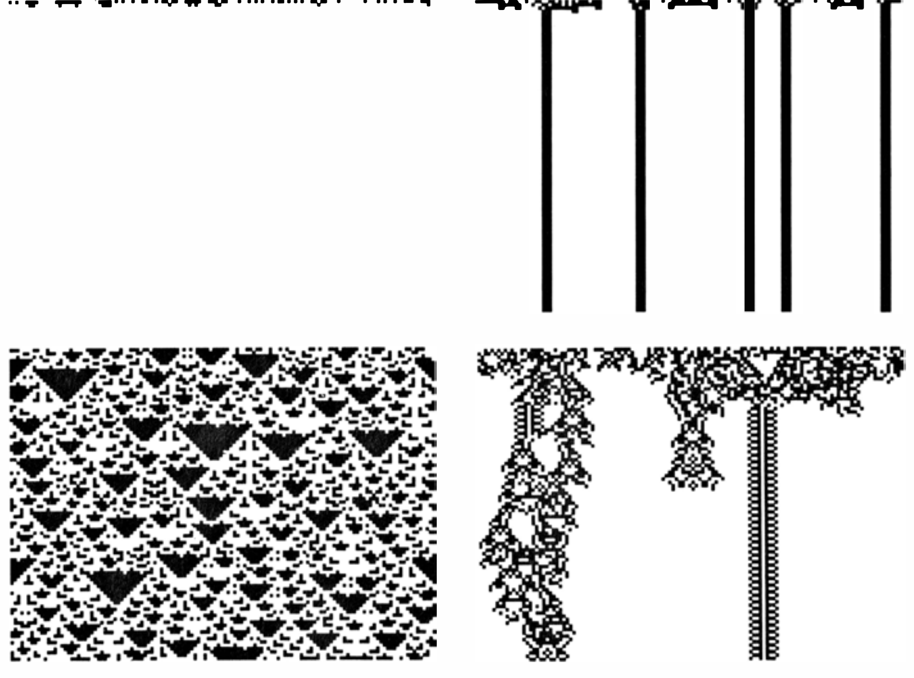
células que componen el entorno de von Neumann ampliado con la casilla central. La aparición de percolación es sumamente sensible a la concentración inicial de unos. Cuando la concentración es menor que un medio, no es probable que en el transcurso de la evolución lleguen a presentarse cadenas continuas de unos que alcancen de uno a otro lado de la formación. A concentraciones de un medio o mayores, sí se presentan cadenas, pero el retículo no queda totalmente ocupado por los unos, y en el régimen estable final subsisten islotes formados exclusivamente por ceros. La nucleación, en la que la formación reticular queda totalmente ocupada por unos, se presenta al exigir tan sólo dos unos de los cinco posibles. Para la nucleación, la concentración crítica es de 0,0822.

El modelo de Ising es un constructo teórico de la física que superficialmente se parece mucho a un autómata celular. Forma el modelo un retículo ortogonal donde cada emplazamiento posee dos valores posibles e interactúa sólo con sus cuatro vecinos más cercanos. El modelo se utiliza preferentemente para describir el ferromagnetismo; cada emplazamiento representa un espín atómico, que ha de apuntar, bien hacia arriba, bien hacia abajo. Cuando la temperatura desciende por debajo de un valor crítico (el llamado "punto de Curie") los espines tienden a quedar alineados en un mismo sentido, con lo que el material se encuentra magnetizado; a temperaturas más altas, la distribución de espines es sensiblemente aleatoria.

Ya en diciembre comenté una versión del modelo de Ising confeccionado mediante uno de los llamados "estadillos electrónicos", cuyas cuadrículas se prestan de modo natural al estudio de los autómatas celulares, si bien se trataba entonces de un retículo provisto de reglas probabilísticas encaminadas a emular el papel de la temperatura. Observé entonces un curioso fenómeno: a temperaturas bajas los espines no adoptaban una alineación uniforme, no se situaban todos en la misma dirección y sentido, sino que adoptaban una distribución escaqueada, a modo de damero, con los espines alternativamente dirigidos arriba y abajo. En cada unidad de tiempo la orientación de todos los espines se invertía. En un material ferromagnético, la configuración alternante es la de máxima energía; debería ser, por tanto, la más inestable: la configuración característica de un material antiferromagnético.



5. Algoritmo para autómatas celulares basados en reglas de transición "totalísticas" o de "recuento"



6. Las cuatro clases de reglas totalísticas unidimensionales

Vichniac había ya descubierto el problema, y halló la explicación. Ordinariamente, al llevar a la práctica un modelo de Ising, tan sólo se consiente el cambio de un espín en cada iteración. Resulta de ello que cuando un emplazamiento concreto examina su vecindario, algunos de los espines que inspecciona son "antiguos", mientras otros son "nuevos". En estas condiciones no puede darse el oscilador antiferromagnético. Tan sólo cuando los espines se recalculan simultáneamente queda favorecido el antiferromagnetismo de alta energía. Existen estrategias para eludir esta "catástrofe por realimentación", pero la enseñanza a deducir verdaderamente es que la correspondencia intuitiva entre el modelo de Ising y los autómatas celulares es engañosa.

Vichniac y otros investigadores del MIT hacen notar que, por su naturaleza, los autómatas celulares son intrínsecamente diferentes de otros modelos físicos. Desde hace mucho, el sistema más difundido de construcción de modelos matemáticos del mundo natural ha sido utilizar ecuaciones diferenciales para expresar las variaciones que sufre una cierta magnitud en función de la posición y del tiempo. Las ecuaciones de Maxwell, por ejemplo, dan las variaciones de intensidad de un campo electromagnético cuando se pasa de un lugar a otro y de un instante a otro. Todas las magnitudes que intervienen en dichas ecuaciones son de carácter continuo; su variación, progresiva. Por su parte, los autómatas celulares son sistemas totalmente discretos. El espacio no es en ellos un continuo, sino una matriz o retículo de casillas. También el tiempo se fragmenta en pasos discretos. Y mientras que la intensidad de campo puede oscilar sobre un intervalo continuo de valores, las celdillas de un autómata celular tan sólo pueden adoptar un número finito de estados.

Evidentemente, tanto el espacio real como el tiempo, u otras muchas variables físicas, son imaginados como variables continuas, no como magnitudes discretas y cuantizadas (al menos, a escala ordinaria). No debe por ello concluirse que las ecuaciones diferenciales generen modelos de la naturaleza intrínsecamente superiores. Sucede no pocas veces que lo significativo no sea el valor numérico exacto de una variable, sino el estado o situación general a que corresponde, como, por ejemplo, si un punto concreto de un copo de nieve en crecimiento es hielo o vapor. En los autómatas celulares tal carácter discreto queda explícitamente declarado, y su evolución temporal puede entonces computarse exactamente, sin necesidad de aproximaciones. Además, permiten dar uso mucho más eficiente a los recursos del ordenador.

Pueden redactarse programas de simulación de autómatas incluso para los más pequeños ordenadores. Aún más, Per Bak, del Laboratorio Nacional del Brookhaven, ha defendido recientemente, en *Physics Today*, que muchas simulaciones físicas pueden realizarse más eficaz y económicamente con un pequeño ordenador personal que con dispositivos más potentes de uso compartido. El ejemplo a que se refirió fue una simulación tridimensional del modelo de Ising, efectuada con un microordenador Commodore VIC-20, de 650 pesetas.

El programa más obvio para autómatas celulares se limita a dar forma al método que seguramente adoptaríamos para ejecutar a mano el procedimiento sobre una hoja de papel cuadriculado. Primero se establece una formación de celdillas, quedando cada casilla representada por un elemento de memoria del ordenador. Para cada intervalo de tiempo, el programa ha de atender por turno a cada casilla, examinar las vecinas a ella y calcular el valor apropiado del siguiente estado de la célula. El cálculo propiamente dicho puede realizarse consultando el valor de una tabla. Si tan sólo se manejan reglas fundadas en

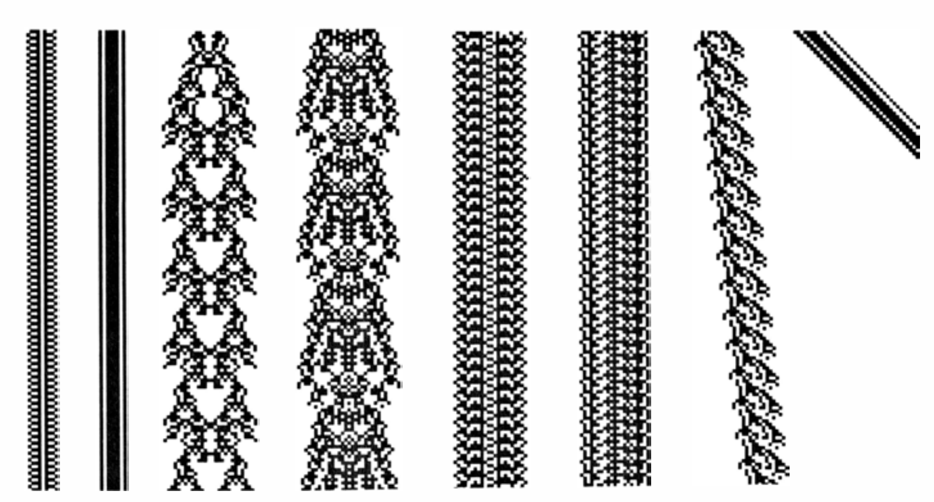
7. Estados sucesivos de un autómata unidimensional de clase IV

recuentos, bastará que la tabla contenga una entrada para cada uno de los posibles números de células en activo. Con otros tipos de reglas, la tabla puede llegar a complicarse mucho.

Al redactar uno de estos programas es preciso tener en cuenta varias cuestiones delicadas. De máxima importancia es la necesidad de no alterar el contenido de una casilla antes de que su valor haya sido consultado por todas las células de las que es vecina. El modo más sencillo de satisfacer este requisito es conservar dos copias de la formación; el programa examina una de ellas para determinar el estado actual del entorno; el resultado de su cálculo se introduce en la otra copia. También es preciso definir con atención las condiciones de contorno. Idealmente, la formación habría de ser infinita, pero ello, como es obvio, será imposible en la práctica. Una técnica de uso común consiste en unir efectivamente los bordes de la formación, convirtiendo en vecinas las casillas situadas sobre lados opuestos. En dimensión uno, este tipo de formaciones son, topológicamente, equivalentes a circunferencias y, en dos dimensiones, a un toro. Estas figuras, aunque finitas, carecen de contornos o fronteras.

Un programa del tipo recién descrito, funcionando en un ordenador digital de uso general, es un procedimiento secuencial que simula las acciones de una matriz de ordenadores que actuasen simultáneamente. Sería mucho mejor una auténtica red de múltiples ordenadores, organizados con la estructura de la formación celular. No debe descartarse *a priori* la construcción de una tal máquina. Los computadores individuales, correspondientes a cada célula, serían tan sumamente sencillos que una sola pastilla de material semiconductor podría albergar muchísimos de ellos. Puesto que tan sólo los ordenadores físicamente cercanos tendrían necesidad de intercambiar información, la complejidad del dispositivo se reduciría en consecuencia. Toffoli ha estimado que un procesador diseñado según estas ideas podría ser entre uno y mil millones de veces más rápido que un ordenador de uso general. El Instituto de Tecnología de California y Thinking Machines Corporation, de Waltham, Massachusetts, han comenzado ya los estudios preliminares de ordenadores de este tipo.

En lugar de un microcircuito diseñado a la medida, Toffoli se vale de una máquina especializada para materializar autómatas celulares, que han construido valiéndose de componentes microelectrónicos ordinarios. Los cálculos se ejecutan secuencial y no simultáneamente para todas las casillas, pero como el dispositivo está cuidadosamente ajustado para efectuar un único tipo de cálculo, es aproximadamente 1000 veces más rápido que los ordenadores de uso general. La máquina en sí está compuesta por unas cuantas placas de circuito impreso, montadas en un chasis; está conectada a un monitor de vídeo en color y la controla otro pequeño ordenador, un Atari 800.


8. Algunos componentes de un posible ordenador universal

La máquina de autómatas celulares de Toffoli genera una matriz de 256 por 256 casillas, capaces cada una de adoptar 256 estados. El estado de cada casilla se recalcula a razón de 60 iteraciones por segundo. La impresión que produce la evolución de un sistema celular al ser procesada a tal ritmo es muy distinta de la que provocan los dispositivos más lentos. En lugar de secuencias de tomas estáticas vemos una película de cine. El juego de la vida deja de ser una majestuosa progresión de figuras y diseños abstractos, para convertirse en la visión al microscopio del mundo de bacterias y protozoos, a los que vemos nadar, agitarse, procrear, devorar y ser devorados.

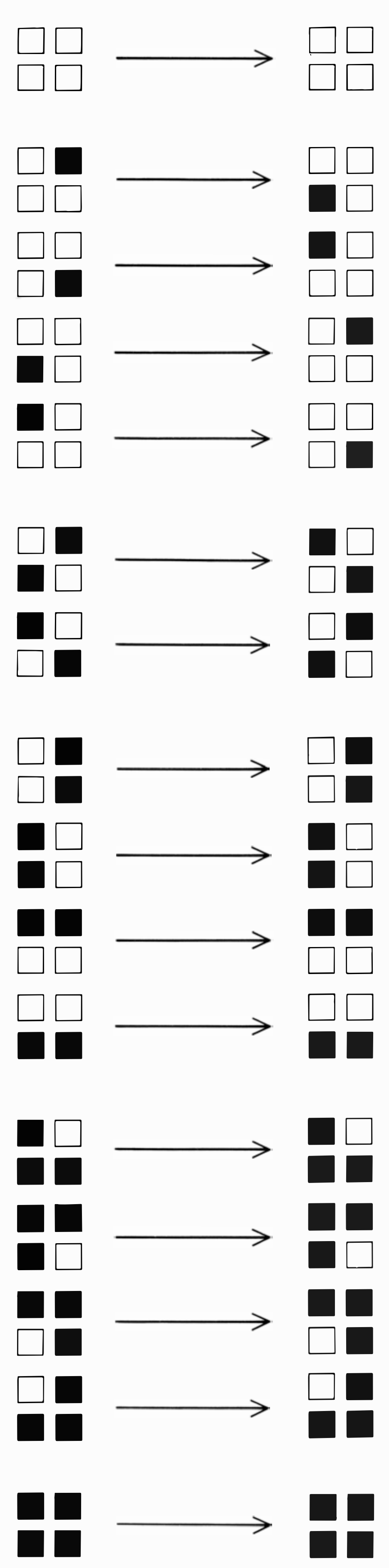
Los autómatas unidimensionales exigen mucho menos del ordenador, en recursos espaciales y temporales. Asimismo, la redacción de programas es ahora mucho más sencilla. La formación lineal tiene otra ventaja todavía sobre la planar: al ser más sencilla la estructura geométrica hay mayores esperanzas de conseguir una comprensión analítica de la evolución del autómata. Y eso es precisamente lo que Stephen Wolfram, del Instituto de Estudios Avanzados, lleva proponiéndose desde hace dos años.

Una generación determinada de una de esas formaciones unidimensionales es una mera alineación de casillas. Podemos, empero, ir dibujando contiguas unas a otras las sucesivas generaciones; se origina así una organización bidimensional provista de un eje de espacios y un eje de tiempo, y la evolución del sistema se capta de una ojeada.

Wolfram ha descubierto que todas las reglas de transición que hasta la fecha ha estudiado pueden agruparse en sólo cuatro categorías. La clase I está formada por aquellas reglas cuya evolución conduce a estados homogéneos y estables, en los que, por ejemplo, todas las casillas acaban tomando el valor cero, o el valor 1. Las reglas de la clase II originan estructuras sencillas que son, bien estables, bien periódicas, pero que en cualquier caso permanecen aisladas unas de otras. Las reglas de la clase III crean configuraciones caóticas, aunque no necesariamente aleatorias. En la clase IV se agrupan las pocas reglas de transición que engendran estructuras de gran complejidad espacial y temporal.

Wolfram ha conjeturado que los autómatas unidimensionales pueden ser los más sencillos de los sistemas bien definidos con capacidad de autoorganizarse en formas complejas. Hay en la naturaleza muchos sistemas dinámicos de carácter continuo que poseen tal capacidad: a partir de un estado aleatorio o caótico evolucionan hacia estructuras sumamente ordenadas (los copos de nieve son un ejemplo). Tal evolución puede explicarse con ayuda de los denominados "atractores", que parecen arrastrar al sistema hacia un subconjunto del total de sus posibles configuraciones.

Se ha establecido un paralelismo entre las clases de autómatas celulares



9. Regla de transición para un ordenador "bola de billar"

y los tipos de atractores observados en los sistemas físicos. Los autómatas de clase I se asemejan a sistemas continuos con el atractor más sencillo: un punto límite, que invariablemente lleva al sistema hacia un mismo estado final. La evolución de un autómata de clase II es bastante análoga a la de un sistema con un ciclo límite, un conjunto de configuraciones que se repite indefinidamente. Los autómatas de clase III, con sus formaciones caóticas, pueden asociarse a entidades más interesantes, llamadas "atractores extraños", características de fenómenos físicos transitorios, como la transformación de un flujo laminar en turbulento. Los sistemas gobernados por atractores extraños evolucionan hacia un subconjunto del total de posibles configuraciones, si bien la estructura de tal subconjunto puede ser superlativamente intrincada. Al visualizar tal conjunto por medio de una formación de puntos del estado resulta en muchos casos una fractal, esto es, una figura geométrica de número fraccionario en dimensiones.

Podemos aclarar las diferencias entre los distintos tipos de autómatas fijándonos en un experimento sencillo. Supongamos que un autómata celular se pone en marcha con cierta configuración inicial, elegida al azar, y que lo hacemos evolucionar muchos pasos; se toma nota del estado final. Retomemos ahora la configuración inicial, modifiquemos el estado de una única casilla, y hagamos evolucionar el sistema idéntico número de pasos que antes. ¿Qué efecto tendrá sobre el estado final el minúsculo cambio inicial? En los autómatas de clase I tal efecto es nulo; pues los autómatas de clase I alcanzan un mismo estado final independientemente de cuál sea su estado inicial. En los autómatas de clase II tal vez se produzcan algunos cambios, pero éstos quedan confinados a una pequeña zona, cercana al punto de perturbación inicial. En los sistemas de clase III, sin embargo, la mera perturbación de una casilla puede provocar perturbaciones que se propaguen por toda la formación celular.

Las reglas de clase IV son las más excepcionales e intrigantes. Hay cierto número de funciones de transición muy sencillas que pertenecen a esta categoría; por ejemplo, en el entorno definido por contener la celdilla central y las dos situadas a cada lado, la regla que estipula que la casilla central sea un 1 si ora dos, ora cuatro, casillas están ocupadas con "unos", origina configuraciones de clase IV. La sensibilidad a perturbaciones pequeñas de las condiciones iniciales es todavía mayor en la clase IV de lo que es ya en clase III. Se conjetura que a fin de predecir el estado futuro de un autómata de clase IV no puede haber un procedimiento general más eficiente que dejar al autómata llevar a cabo el cómputo correspondiente.

Hay una conjetura emparentada con ésta, de más ambicioso alcance: sugiere que los autómatas de clase IV pudieran ser homologados como máquinas universales de cómputo. La más conocida máquina conceptual de esta naturaleza es la máquina universal de Turing. Si una función es de algún modo computable, una máquina de Turing habrá presumiblemente de ser capaz de computarla. Puede demostrarse el carácter universal de otras máquinas probando que son equivalentes a máquinas de Turing. Ha podido de esta forma establecerse que diversos autómatas celulares (el juego de la vida, entre ellos) son máquinas universales de cómputo; se ha dado también una demostración de equivalencia para un complicado autómata unidimensional con células de 18 estados. De ser cierta la conjetura, los autómatas de clase IV pasarían a ser los más sencillos computadores universales conocidos. Ya se ha podido identificar en ellos muchos de los componentes básicos de la máquina universal. Un elemento importante, del que todavía se carece, sería un reloj, esto es, una estructura que emita un tren de impulsos a intervalos regulares, como hace, por ejemplo, el cañón lanza-deslizadores.

Al considerar los autómatas celulares como dispositivos con capacidad de cómputo, resulta natural preguntarse si sus propiedades de autoorganización podrán caracterizarse a partir de sus propiedades computacionales. Así, por ejemplo, podemos imaginar que conjuntos de configuraciones, generadas por evolución de un autómata celular, constituyen un lenguaje formal. Cada configuración se considera entonces una palabra del lenguaje, formada por una sucesión de símbolos que representan los valores que ocupan los emplazamientos del autómata de conformidad con un sistema de reglas gramaticales. Wolfram ha demostrado que la configuración generada por cualquier autómata celular en un tiempo finito puede describirse mediante una clase sencilla de lenguajes formales, conocidos por lenguajes regulares. Para cualquiera de estos lenguajes regulares es posible hallar una gramática de sencillez máxima. Esa gramática da una descripción minimal de las configura-

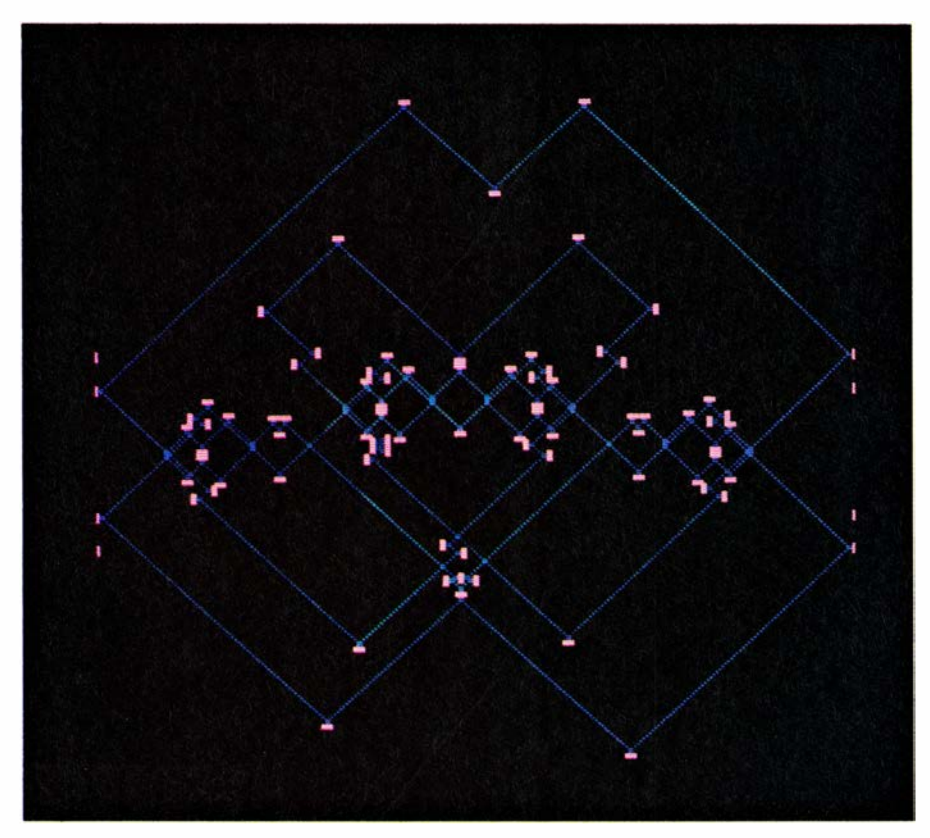
ciones del autómata celular; su tamaño puede ofrecernos una medida de la complejidad de las configuraciones. Para autómatas celulares de clase I y II, la complejidad tiende hacia un límite finito para valores grandes del tiempo, por lo que las estructuras generadas por esos sistemas quedan descritas por lenguajes regulares. Sin embargo, para autómatas de clases III y IV, la complejidad suele ordinariamente crecer rápidamente con el tiempo; según parece, hacen falta lenguajes formales más complicados para describir el comportamiento de tales sistemas para valores grandes del tiempo.

Hay una clase especial de autómatas celulares conocidos por autómatas invertibles, o reversibles. En los autómatas reversibles puede partirse de una configuración inicial cualquiera, hacerla evolucionar durante un número cualquiera de pasos, detener el proceso, dar marcha atrás y retornar exactamente al estado inicial. Las configuraciones creadas por un autómata reversible típico tienen un aspecto característicamente distinto del de las generadas por autómatas no reversibles. En particular, si la configuración es inicialmente aleatoria, tiende a permanecer aleatoria. No aparecen estructuras autoorganizadas.

Una condición necesaria para la reversibilidad del autómata es que la regla de transición sea determinística, tanto en el sentido de progresión como de regresión. Es decir, cada uno de los posibles estados de cada entorno ha de tener sucesor y predecesor únicos. El juego de la vida es no-reversible, porque resulta imposible determinar sin ambigüedad el predecesor de un estado dado. Por ejemplo, si una célula se encuentra "muerta" en el instante actual, pudo en la generación anterior tener cualquier número –excepto tres– de vecinas vivas. Fredkin ha inventado un procedimiento sistemático para definir reglas de transición reversibles, que ha sido analizado ulteriormente por Margolus. En esencia, tal método consiste en hacer depender el estado siguiente de cada célula de los dos estados anteriores del entorno. El estado correspondiente a $t + 1$ está dado por cualquier función del entorno en el instante t, menos la misma función en el instante $t - 1$. La inversión es entonces inmediata: el estado correspondiente a $t - 1$ ha de venir dado por el estado en el instante t menos el correspondiente a $t + 1$.

A causa del determinismo bidireccional, en la evolución de los autómatas celulares no pueden darse atractores. La presencia de un atractor implica que la evolución de muchos estados iniciales distintos discurra por vías que acaben confundiéndose. En la evolución retrógrada, los puntos de confluencia se transforman en puntos de ramificación, perdiéndose el carácter determinístico del proceso. Análogamente, los autómatas reversibles no pueden jamás entrar o salir de un bucle, es decir, una sucesión cíclicamente repetida de estados, pues habría de presentarse un punto de ramificación en una u otra dirección. Al quedar excluidos tanto los atractores como las configuraciones capaces de auto-organización con ellos asociadas, podría pensarse que las reglas de transición reversibles generan autómatas muy poco interesantes, pero tal falta de interés queda compensada por otras características de estos sistemas. Un hecho muy destacable es que el contenido de información de una estructura celular cualquiera de un autómata reversible resulta ser una magnitud conservada (que no puede aumentar ni disminuir en el decurso de la evolución del autómata). Esta propiedad confiere a los autómatas reversibles importante papel como modelos de computación.

Margolus ha construido un computador de tipo autómata celular basado en un sistema mecánico imaginario que Fredkin ya había analizado: el modelo de computación por "bola de billar". En tal modelo, los *bits* de información (los unos y ceros) son transportados por bolas de billar ideales, que se mueven sin rozamiento y rebotan de forma elásticamente perfecta al chocar entre sí o contra obstáculos. La presencia de una bola en una posición designada representa un 1 binario; su ausencia se traduce por un 0. Gracias a una perspicaz disposición de "deflectores" es posible crear diversas puertas lógicas, análogas a las de un ordenador electrónico. En una puerta *Y*, por ejemplo, la única forma de que una bola de billar pase a través de la región de salida (y registre por consiguiente un 1 binario) es que dos bolas se aproximen simultáneamente a la puerta según trayectorias específicas. La versión del modelo de bolas de billar que Margolus da mediante un autómata celular es un ejemplo de regla de transición sencilla, si bien un tanto insólita. Las casillas no se toman individualmente, sino en bloques de cuatro; cada una de las posibles organizaciones que pueden darse en el seno de un bloque se transforma en una única formación producto. La regla está diseñada de modo que un único 1, situado sobre un fondo de ceros, se propague a lo largo de una de las cuatro direcciones diagonales del retículo, a razón de una casilla por unidad de



10. El ordenador "bola de billar" en pleno funcionamiento

tiempo; el 1 aislado es la encarnación de la bola de billar. Un bloque macizo de cuatro unos permanece indefinidamente invariable, y actúa a modo de reflector perfecto. Cuando se hace funcionar el modelo sobre la máquina autómata celular de Toffoli, las "bolas de billar" cruzan como centellas la pantalla del monitor, siguiendo pautas intrincadamente entretejidas. Al observar este ordenado (si bien frenético) movimiento, cuesta recordar que el programa no tiene representaciones de las trayectorias de las bolas; se limita a aplicar a las casillas una misma regla.

El modelo "de bolas de billar", y su concreción en forma de autómata celular, tienen importantes consecuencias en teoría de computación. Se ha conjeturado que todo computador ha de poseer componentes que disipen tanto energía como información; según tal razonamiento, existe un límite termodinámico para la eficiencia de los ordenadores, al igual que existe un límite para el rendimiento de los motores térmicos. Las pérdidas, presuntamente inevitables, de información y energía son consecuencia inevitable de la irreversibilidad del proceso de cómputo. (Cuando un ordenador suma 5 y 3 y obtiene el resultado 8, el proceso es irreversible, porque hay infinitos pares de números cuya suma daría el mismo resultado.)

Fredkin, Toffoli y Margolus hacen notar que el modelo "de bolas de billar" ofrece un argumento contrario a la noción de disipación inevitable. En el ordenador de "bolas de billar" no se pierde información. En efecto, las bolas de billar propiamente dichas no pueden crearse ni destruirse; toda la información que define su disposición inicial se conserva durante la evolución del sistema. Los sumandos de una suma se recuperan sin más que invertir las trayectorias. En teoría, el computador "bola de billar" podría funcionar sin consumo de energía.

La relación entre la física y la teoría de computación ha sido expresada con especial claridad por Toffoli, en una declaración que pudiéramos considerar descripción del mayor de los autómatas celulares. "En cierto sentido", escribe Toffoli, "podría decirse que la naturaleza ha estado ininterrumpidamente calculando 'el estado siguiente' del universo durante miles de millones de años; todo cuanto tenemos que hacer, y en realidad, lo más que podemos hacer, en este inmenso cómputo en continuo desarrollo, es practicar el 'auto-stop' y ver de descubrir si, por azar, alguna de sus partes pasa cerca de donde queremos ir".

Taller y laboratorio

¿Cómo ve el pez al pescador y a la mosca que le lanza como cebo?

Jearl Walker

El pescador, atento al agua, ve un pez. ¿Dónde ha de lanzar el cebo? Aconseja la tradición echar la mosca en el punto situado inmediatamente sobre la posible presa. ¿Por qué tamaña precisión? Hemos fallado por unos centímetros, ¿seguirá el pez viendo la mosca? Robert Harmon y John Cline, abogados de patentes de Chicago, han estudiado la óptica de la pesca con mosca. Concluyen que el lanzamiento ha de ser lo más preciso posible; si así no ocurre, la imagen que el pez verá podría resultar excesivamente deformada por la refracción de los rayos luminosos en la superficie del agua.

Se conoce perfectamente a qué velocidad se propaga la luz en el vacío: 3×10^8 metros por segundo. En todo otro medio transparente, esa velocidad es inferior, pues la luz interactúa con las moléculas del medio. Cada una de estas interacciones puede considerarse una absorción momentánea de la luz.

Para describir el retraso neto que sufre la luz a su paso por un medio, el camino más corto es afirmar que se propaga con mayor lentitud. Y así se atribuye un índice de refracción a cada medio transparente. La celeridad de la luz en un medio es igual entonces a su celeridad en el vacío dividida por el índice de refracción correspondiente. El índice de refracción del agua es de 1,331 aproximadamente y el del aire es muy poco mayor que 1. La velocidad efectiva de la luz en el aire viene a ser casi igual que en el vacío, mientras en el agua resulta bastante menor.

En virtud de esa distinta velocidad, cuando un rayo de luz atraviesa la superficie del agua se refracta (cambia de dirección). Por convenio, la orientación de un rayo se mide respecto a la perpendicular a la superficie que cruza. Supongamos que un rayo incida sobre la superficie del agua en un ángulo de 42 grados respecto a la vertical. De esa luz, parte se reflejará en la superficie en un ángulo igual al de incidencia; el resto se refractará en el agua bajo un ángulo de 30 grados respecto a la vertical.

Con ángulos de incidencia distintos se tendrán otros ángulos de refracción. La relación entre ángulos viene definida por la ley de Snell, en honor de Willebrord Snell, quien la propuso en 1621. De acuerdo con la misma, el seno del ángulo de refracción en el agua es igual al seno del ángulo de incidencia en el aire multiplicado por un coeficiente. Coeficiente que es la razón entre los índices respectivos (aire:agua). En todos los casos, salvo en uno, el ángulo de refracción es menor que el de incidencia. La excepción la constituye el caso en que el rayo incide verticalmente, cuando entrará en el agua sin desviarse.

Consideremos un rayo que llegue a un pez procedente de un objeto situado a corta distancia de la superficie del agua. Si el pez es capaz de asignar una posición al origen de ese rayo (como lo haría un ser humano), interpretará que el objeto se halla en un punto situado en la dirección del rayo. Y, así, situará el objeto en un punto del espacio bajo un ángulo superior al verdadero. Este error será pequeño si el ángulo de incidencia es pequeño, y grande, si dicho ángulo es grande.

Los rayos que más se refractan son los procedentes de la vecindad del horizonte, que inciden en el agua bajo un ángulo inferior, por muy poco, a los 90 grados; le corresponde un ángulo de refracción de 48,7 grados, aproximadamente. (El valor exacto dependerá del índice de refracción del agua.) Ningún rayo proveniente del aire puede llegar al pez bajo un ángulo de refracción mayor que ese. De aquí que todos los rayos que lleguen al pez desde el aire se hallarán comprendidos en un cono cuyo vértice estará en el ojo del pez y cuya generatriz formará un ángulo de 48,7 grados con la vertical.

A la intersección de ese cono con la superficie del agua Harmon y Cline llaman "la ventana"; a través de ella el pez ve los objetos situados por encima del agua. Todo rayo que proceda del horizonte pasará por el marco de la ventana y, luego, descenderá a lo largo de la superficie lateral del cono. El tamaño de la ventana es función de la profundidad a la que se halle el pez. Cuando esa distancia sea de 10 centímetros, el radio de la ventana será de 11,3 centímetros. Con una profundidad mayor, crecerá el tamaño de la ventana, pero no se alterará la abertura del cono, cuyo valor lo establece la refracción de los rayos rasantes.

La visión que del mundo externo se le presenta al animal es anamórfica: la ampliación difiere en dos direcciones perpendiculares. Vale decir que la refracción deforma e introduce los objetos en la visión del pez. Quién sabe si esos vertebrados pueden interpretar esas visiones anamórficas y entienden que los objetos que aparecen en la ventana se encuentran a cierta distancia por encima de la superficie del agua. Pero quizá no sea así, y los peces vean esos objetos como si estuvieran en la superficie. En cualquier caso, ¿cómo ve un pez al pescador?

Valiéndome de un ordenador personal, me apresté a calcular cuál sería la refracción de cuatro varas verticales situadas a varias distancias de un pez. Programé el ordenador para que hiciera los cálculos en el supuesto de que cada vara se extendiese un metro por encima del agua y 20 centímetros por debajo de ella, lo que simula, con buena aproximación, la figura del pescador, puesto en pie, en aguas someras. Alojé al animal en una profundidad teórica de 10 centímetros, zona verosímil para un pez en busca de alimento.

Empecé considerando una vara situada a una distancia horizontal del pez de dos metros. Todo rayo procedente de la porción sumergida de la vara no se refracta y se percibe (si el pez puede verla a esa distancia) en su lugar verda-

dero. Todo rayo que proceda de un punto de la vara inmediatamente contiguo al nivel del agua pasará por el borde de la ventana y viajará a lo largo de la superficie lateral del cono imaginario que señala el límite de los rayos que llegan al pez desde el aire. Este rayo podría interpretarlo el animal originándose en algún lugar de una recta que formase el mismo ángulo con la vertical. Si es así, la línea de agua de la vara parecería hallarse en una recta separada 48,7 grados de la vertical.

Todo rayo que proceda de la punta de la vara pasará un poco más cerca del centro de la ventana y su ángulo de refracción será del orden de 42 grados. Este rayo podría interpretarlo el pez arrancando de una recta que fuese una extrapolación hacia atrás del rayo refractado. Si es así, la punta de la vara parecería hallarse en una recta separada 42 grados de la vertical. Entonces, si el pez es sensible a la profundidad, le parecerá que la vara se encuentra en el aire inclinada entre 42 y 48,7 grados respecto a la vertical.

Esta situación se representa en la figura 5. La imagen de la vara se curva entre los dos ángulos en cuestión. Para dejar sitio a los otros elementos de la ilustración, la imagen se representa a una distancia de la ventana aproximadamente igual a la que la vara tiene en la realidad.

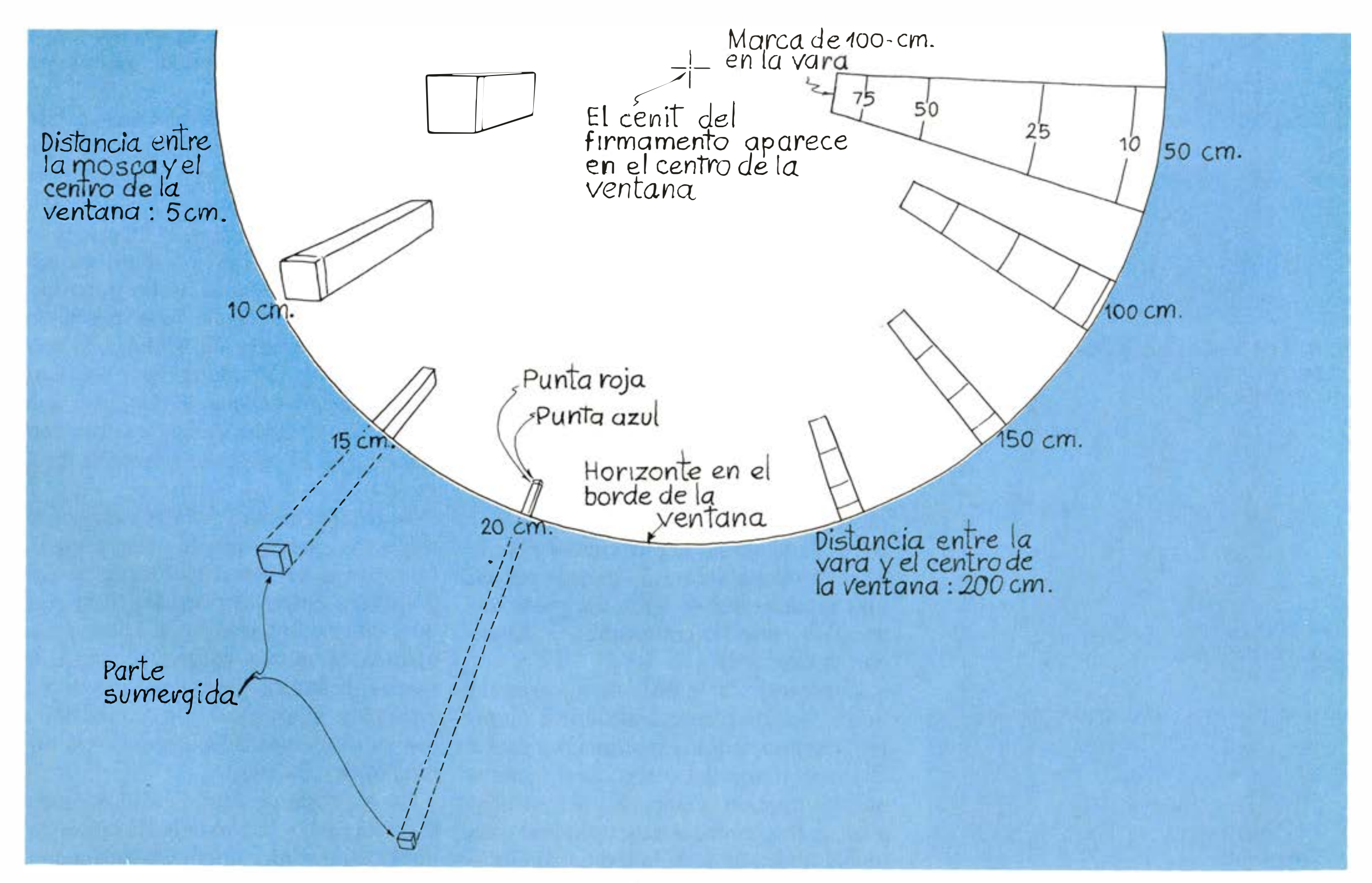
Ese dibujo no hay que tomarlo como artículo de fe. Desconozco si los peces son capaces de extrapolar mentalmente rayos luminosos. Ni siquiera sé si conocen lo que es una vara. Seguramente serán incapaces de sacar la conclusión de que un objeto así deformado es en realidad una vara rígida y vertical. Gran parte de la aptitud humana para asignar profundidad y forma a los objetos procede de la experiencia con objetos de este tipo.

El ordenador calculó las posiciones angulares de otras tres varas. En todos los casos, el pez ve dos imágenes de cada una de ellas. La parte situada por encima del agua la aprecia a través de la ventana. La parte sumergida la distingue en su posición verdadera y perfectamente separada de la anterior. Conforme se traslada una vara hacia la ventana las dos partes se acercan una a otra, fundiéndose al final cuando la vara llega al marco de la ventana.

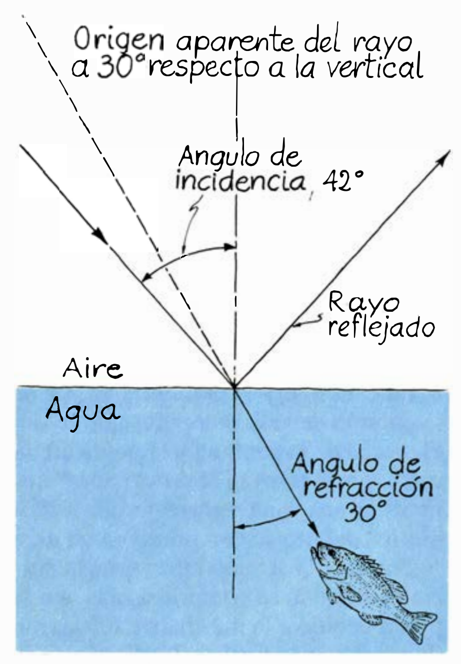
En la figura 1 se representa una vista plana de las varas tal como se observan refractadas por la ventana. Un pez carente de sensibilidad a la profundidad y de conocimiento de lo que está contemplando depende, probablemente, de visiones así en lo referente al mundo exterior. Para que las varas no se sobrepongan en la figura, las he distribuido de suerte que descansen en un círculo en torno al pez. Sus tamaños y distancias a éste son los mismos que antes. Las porciones sumergidas no se representan porque están demasiado lejos para adaptarse a la ilustración. Las señales en las varas indican alturas sobre el nivel del agua.

En esta figura el extremo inferior de la porción de vara emergida aparece en el marco de la ventana y la punta en un radio y más cercana al centro de la ventana. O sea, una vara colocada a dos metros del pez se comprime en un área reducida. El extremo inferior de la porción emergida se comprime más que la punta debido a la más fuerte refracción de los rayos que salen de ella. La imagen de esta vara ocupa menos de 2,5 centímetros a lo largo de un radio de la ventana. Y como por todo el marco de la ventana pueden asomar múltiples objetos más que rodeen a la masa de agua, podría ocurrir que la vara se confundiera en la turbiedad consiguiente.

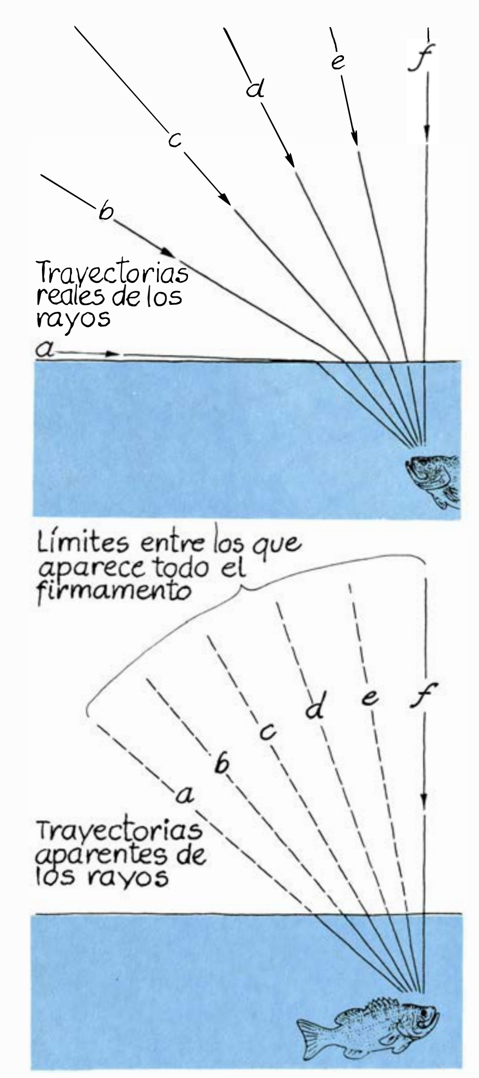
En las varas situadas a 1,5 y 1 metro del pez se manifiesta menos compre-



1. Vista a través de una "ventana" en la superficie del agua



2. Refracción en una superficie acuática



3. Rayos de luz reales y aparentes

sión. Ahora bien, al extenderse más hacia el centro de la ventana, aparecen sensiblemente ahusadas, deformación y estilización que se ofrece incrementada a 50 centímetros del pez. La imagen completa de la porción no sumergida abarca alrededor del 70 por ciento de un radio de la ventana; por ello, debe resultar muy patente para el animal.

Mi vara equivale a un pescador de corta estatura. A dos o más metros del pez, nuestro hombre queda comprimido en una miniatura que ocupa apenas una pequeña parte de la ventana y se pierde enmascarado en el desorden, o turbiedad, del marco. Pero, a medida que se acerca al pez, va ocupando un ángulo mayor en el campo visual de éste y abarca una porción mayor de ventana. Por su lado, la parte sumergida del pescador se agranda asimismo en el campo visual del animal.

En cierto instante, el movimiento de alguna de esas imágenes advierte al pez de un peligro potencial. El movimiento de la parte emergida del pescador se perfila como una imagen que nace en el alféizar de la ventana y crece radialmente hacia el centro. Acaso el pez se quede al acecho del movimiento esperando que arroje una imagen completa entre el marco y el centro.

La óptica aplicable a la aparición de una mosca lanzada en la proximidad de un pez es análoga. En la parte izquierda de la figura 1 se representan algunas posibilidades. Por comodidad he considerado una mosca rectangular estrecha que sobresale 2,5 centímetros de la superficie del agua y se hunde 0,2 centímetros en ella. (Su altura es casi la misma que la de un cebo mosca del n.° 4. Su anchura sobre la superficie es irrelevante.) Si bien no es probable que una mosca rectangular resulte apetitosa para un pez, nos servirá para poner de manifiesto la deformación que provoca la refracción.

Programé el ordenador para que determinara la imagen que da la mosca en la ventana. Si la línea de flotación de la mosca está a cinco centímetros del centro de la ventana, la parte emergida de aquélla ocupa sólo 1,3 centímetros en una recta radial de ésta. La parte sumergida, que se comprime, se funde con la emergida.

Conforme la mosca se acerca al borde, su imagen se alarga. Por ejemplo, cuando su línea de flotación está a 10 centímetros del centro de la ventana, la porción emergida del insecto abarca tres centímetros radiales: más que la altura de toda la mosca. La imagen de la porción sumergida, que sigue unida a la de la porción emergida, se alarga también un poco, permitiendo que el pez distinga mejor el cebo.

Cuando la mosca atraviesa el alféizar de la ventana, la imagen de la porción emergida comienza a contraerse; la de la porción sumergida se separa de la anterior. En la figura se muestra la situación cuando el cebo está a 15 centímetros del centro de la ventana. La parte superior de la porción sumergida se ve a su distancia real del centro. La parte inferior de la porción emergida aparece en el alféizar. La parte superior de la mosca, que está realmente 2,5 centímetros sobre el agua, se presenta a sólo 1,9 centímetros del borde de la ventana. La mosca ya no se ve con la misma facilidad.

Cuando la mosca se desplaza 20 centímetros del centro de la ventana, la contracción aparente de la porción emergida es mayor. El límite inferior de esa porción sigue en el marco de la ventana, mientras la parte superior aparece entonces a unos 0,8 centímetros del borde. Esta contracción de la imagen de la porción emergida puede perderse en la turbiedad existente en el borde. Distinguir el cebo resulta ahora más difícil. Además, la imagen de la porción sumergida queda totalmente separada de la imagen existente en la ventana. Y, pese a que ambas imágenes se sigan percibiendo, es probable que un pez vea dos objetos, ambos pequeños.

Harmon y Cline afirman que, al pescar con mosca, si se ve el pez, hay que arrojarle el cebo lo más cercano posible. Si se puede colocar la mosca dentro de la ventana, quizás el pez reconozca al insecto. Por lo menos estarán fundidas las imágenes de las porciones emergida y sumergida. Si la mosca cae en la ventana cerca del alféizar, la imagen de su porción emergida se ampliará en el sentido de que su longitud a lo largo de un radio de la ventana será mayor que el verdadero tamaño de la mosca.

Si el lanzamiento falla por unos centímetros, puede que la mosca quede fuera de la ventana. Entonces, la disgregación entre las porciones sumergida y emergida hará que la imagen que ofrezca la mosca apenas recuerde lo que es. E incluso cabría que la porción emergida apareciera tan comprimida que su imagen se confundiera en la turbiedad del alféizar.

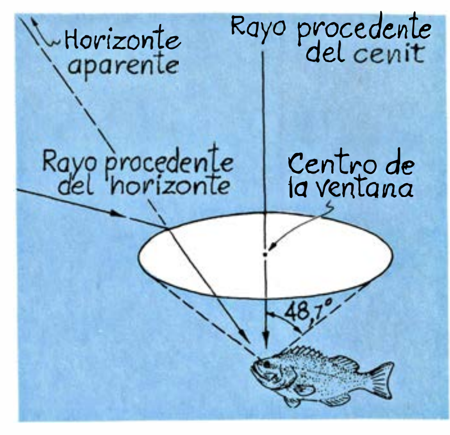
La cuestión se complica si el pescador está alineado con el pez y la mosca, pues su imagen aumenta la turbiedad. En tal situación, su única posibilidad de

atraer al pez se reduce a la imagen de la parte sumergida del cebo, que la presa percibirá sin la distorsión causada por la refracción. Harmon y Cline sugieren la conveniencia de que esa parte de la mosca esté brillantemente coloreada.

Hasta aquí he supuesto que el índice de refracción del agua posee un valor único. Lo cierto es que difiere para las distintas longitudes de onda de la luz. Si ésta es roja, la que posee longitudes de onda más largas, el índice valdrá alrededor de 1,331. La luz azul, que se sitúa en la zona de ondas cortas del espectro, tiene un índice del orden de 1,343. Supongamos que en el agua penetre un rayo de luz blanca, es decir, compuesta de todos los colores. La refracción desplegará entonces esos colores en un abanico estrecho, de tal modo que el rayo de menor ángulo de refracción será el azul y el de mayor ángulo, el rojo. Los colores de longitudes de onda intermedias tendrán unos ángulos de refracción intermedios. Esta descomposición de los colores se llama dispersión.

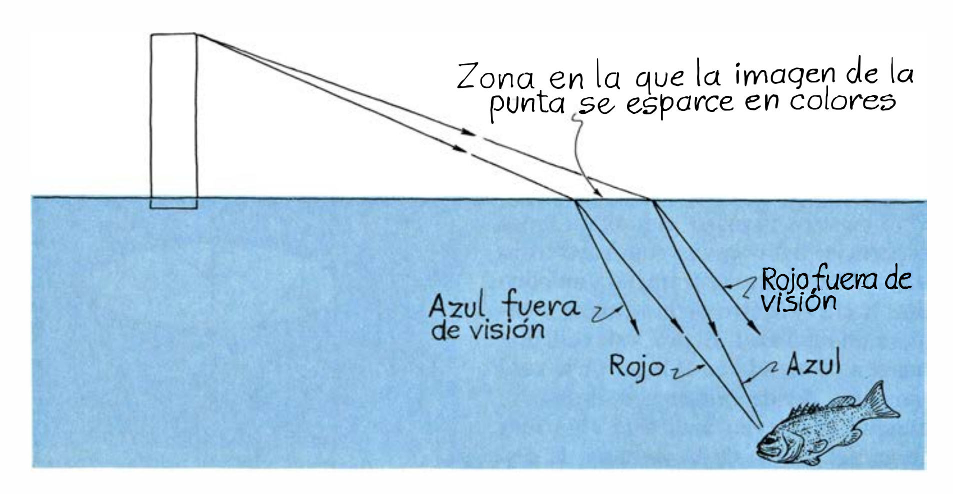
Harmon y Cline señalan que la dispersión desempeña un papel secundario en la imagen que ve un pez por la ventana. Para investigar este extremo sometí a consideración los rayos de luz blanca con origen en la parte superior imaginaria de mi mosca rectangular. Uno de esos rayos se refractará en la superficie para enviar un rayo rojo hacia el pez. Otro se refractará un poco más hacia el centro de la ventana y enviará un rayo azul. El pez, así, verá una imagen coloreada en el lugar de la ventana por donde cruzan los rayos. Y, aunque la imagen azul esté algo más cerca del centro de la ventana, la dispersión de la imagen coloreada será escasa, a menos que la mosca quede totalmente fuera de la ventana. Pero, aún así, la dispersión no comprenderá más de un milímetro de ventana aproximadamente.

En la superficie del agua exterior a la ventana lo que ve el pez es, en gran parte, la reflexión de los rayos que, diseminados, proceden del fondo. Aunque la refracción en la superficie y hacia el aire está garantizada por la ley de Snell, para ciertos rayos tal refracción resulta imposible. Que un rayo se refracte o no depende del ángulo de incidencia. Si éste es inferior a 48,7 grados, parte de la luz se refractará en la superficie y el resto se reflejará hacia abajo. Según la ley de Snell, el ángulo de refracción (en el aire, ahora) debe ser mayor que el de incidencia. Sin embargo, el ángulo de refracción puede llegar a valer 90 grados, que es cuando



4. Geometría de la ventana

5. Así vería un pez las varas en el agua



6. Dispersión de la luz

el rayo refractado apenas roza la superficie del agua.

Si el ángulo de incidencia es mayor que 48,7 grados, la refracción es imposible; la luz podrá únicamente reflejarse. (Esta situación es conocida por reflexión total, ya que la luz es incapaz de salir del agua.) Toda luz que se refleje hacia el pez en la cara inferior de la ventana tendrá un ángulo inferior a 48,7 grados; además, parte de ella se refractará en el aire. Un rayo que se refleje exactamente en el alféizar de la ventana poseerá un ángulo de incidencia de 48,7 grados, transmitiendo una componente refractada paralela a la superficie del agua. Toda luz que se refleje hacia el pez en el resto de la superficie debe tener un ángulo de incidencia mayor que 48,7 grados; esta reflexión será total. Las reflexiones procedentes de la zona de la ventana quizá se confundan en el fulgor de la luz del cielo, pero las procedentes de los demás lugares podrían ser lo bastante intensas para ofrecer al pez una imagen especular del fondo.

Toda esta fenomenología óptica es válida para el caso de un pez que mire a través de las paredes de un acuario. Aquí, claro está, la ventana yace en un plano vertical. La deformación anamórfica debida a la refracción alterará la geometría de los objetos exteriores al acuario. Un objeto realmente plano presentará la forma de un acerico.

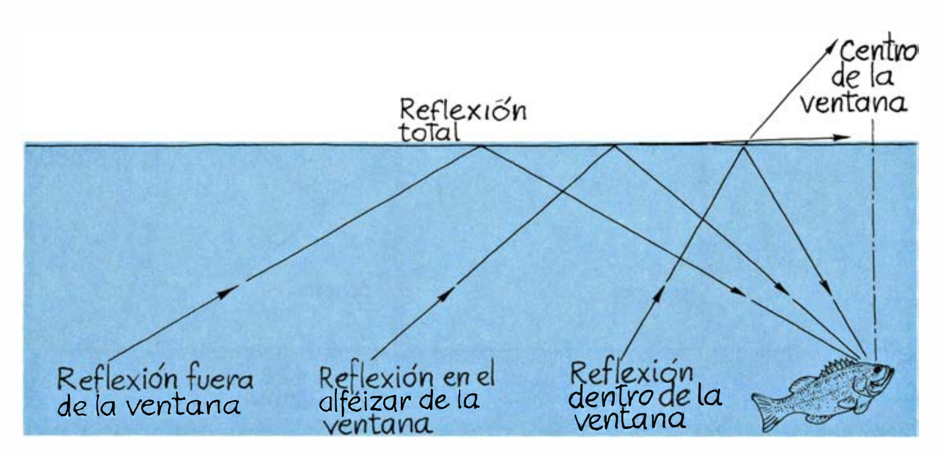
Dentro del agua el ojo humano abierto no observa ninguna distorsión óptica de esas porque está adaptado a la visión en el aire. De la refracción normalmente necesaria para enfocar, unos dos tercios se produce en la superficie del ojo. Como éste tiene un índice de refracción casi igual al del agua, si está sumergido, no puede facilitar esa refracción y se muestra incapaz de enfocar los objetos cuya imagen aparece en la ventana. Pero es posible recuperar la capacidad de enfoque con una mascarilla de buceo que atrape aire delante de los ojos. ¿Se verá entonces la ventana? No, si el plano de la mascarilla es paralelo a la superficie del agua. Efectivamente, cuando los rayos pasan desde el agua al aire de la mascarilla, la refracción restituye sus direcciones de propagación originales. Así, desaparece el cono límite de los rayos y, por tanto, también la ventana. Sugiero al lector que estudie esta cuestión para otras orientaciones de la mascarilla.

Acabo de hacer una breve referencia a otro problema común de la pesca relacionado con la refracción. ¿Es posible ver un pez en su verdadera posición? La cuestión es decisiva para los aficionados a la pesca con arco y flecha. ¿Debe apuntarse la flecha directamente al pez, tal como se ve? La respuesta es negativa. A menos que la presa se encuentre exactamente debajo de la superficie, hay que apuntar más abajo dentro de nuestro campo visual. Ocurre que los rayos que nos llegan procedentes del pez se refractan según la ley de Snell, para acabar con unos ángulos respecto a la vertical superiores a los iniciales. Cuando el deportista recibe un rayo de esos, lo extrapola mentalmente hacia atrás para ubicar su origen, con lo que se engaña creyendo que el pez anda en esa dirección.

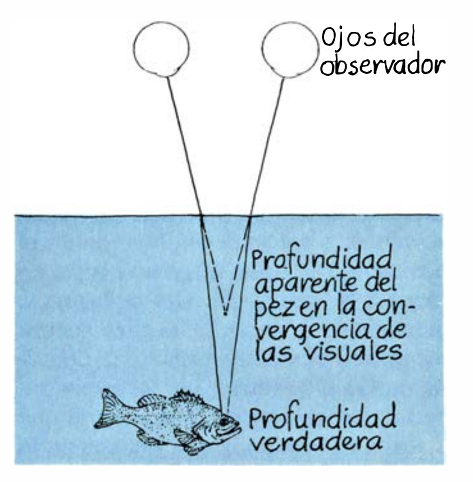
Lawrence E. Kinsler ha abordado problemas similares acerca de la refracción de los rayos procedentes de objetos sumergidos. Señala que la profundidad de un objeto se estima erróneamente, aun cuando dirijamos la vista directamente desde encima. Gran parte de esa estimación de la distancia hasta el objeto se basa en el ángulo que debe girar cada ojo para que las visuales de ambos converjan en el mismo. Ahora bien, como los rayos se refractan antes de llegar a los ojos, el punto de convergencia se encuentra por encima del objeto, creando la ilusión de que éste no yace tan profundo como lo está en realidad.

En las observaciones desde otros ángulos aparecen errores del mismo tipo en la asignación de profundidad. En la figura 9 se resumen las conclusiones (para un pez) de Kinsler. Se incluye un rayo que representa la luz que viaja del pez al observador. De hecho, cada ojo recibe un rayo en una dirección ligeramente distinta. Por ello, el observador piensa, por extrapolación, que el pez está más atrás. En la figura se ilustra esa extrapolación para el rayo tomado como representativo. La convergencia de las visuales determina en qué punto de la extrapolación aparenta estar el pez. Y el resultado es que éste parece hallarse más alto en la vertical de su posición verdadera.

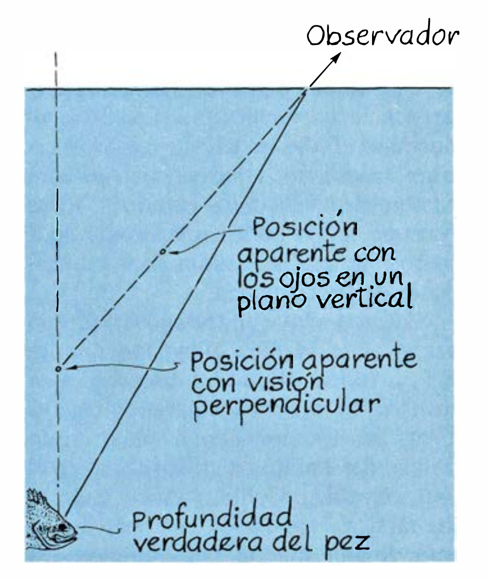
Esta es la ilusión óptica que se produce en la contemplación perpendicu-



7. Reflexiones en la cara inferior de la ventana



8. Ilusión de profundidad



9. Dónde está un pez y dónde aparenta estar

lar de un pez. Supongamos que el observador esté tumbado en un malecón con sus ojos fijos en un plano vertical. Como antes, el pez parecerá encontrarse, por extrapolación, más atrás en la vía de los rayos que llegan a los ojos. Esta vez aparentan proceder de un lugar situado más arriba y más cerca del observador.

Podemos descubrir esas ilusiones con un experimento sencillo. Llénese de agua una bañera. Contémplese una moneda depositada en el fondo. Cuando la visual esté muy separada de la vertical, la profundidad aparente de la moneda estará en evidente contradicción con la altura de la bañera. Al mover la cabeza para colocar los ojos en un plano vertical, la posición aparente de la moneda cambiará inmediatamente de modo que parezca estar más arriba y más cerca.

Libros

Sociología de la ciencia, cosmología astrofísica, Edad de Piedra y nueva experiencia matemática

F. Bujosa, M. Artigas, D. Fletcher y M. Guzmán

SOCIOLOGY OF SCIENTIFIC KNOWLEDGE. A SOURCE BOOK. Editado por H. M. Collins. Bath; Bath University Press, 1982. Nadie osaría afirmar, ahora, en 1984, que la sociología del conocimiento científico es ya una disciplina con un cuerpo doctrinal perfectamente delimitado y con un programa de investigación claro. Es lógico, por tanto, que a la hora de definir esta joven corriente se acuda a indicar cuáles son sus orígenes y en qué se diferencia de otras disciplinas con las que pudiera confundirse, más que a concretar cuáles podrían ser los posibles paradigmas de esta nueva orientación. Los clásicos de la sociología del conocimiento –Weber, Mannheim–, la filosofía de Wittgenstein, el pensamiento etnometodológico –especialmente el de Garfinkel–, la sociología de la ciencia –léase Merton y sus discípulos–, el historicismo relativista de Kuhn y las tesis marxistas sobre la influencia de los factores económicos y políticos sobre el desarrollo científico –recuérdese el famoso trabajo de Hessen sobre la física de Newton– han sido, sino todas, sí las principales fuentes donde han bebido los partidarios de la sociología del conocimiento científico.

A pesar de que reconocen la deuda contraída con los trabajos de Merton y los demás sociólogos de la ciencia, les importa mucho, a los adeptos a la sociología del conocimiento científico, marcar claramente las líneas que les separan de los clásicos de la sociología de la ciencia. Esta disciplina estudia las condiciones sociales en la que se desarrolla el cultivo de la ciencia y cómo determinadas condiciones han estimulado o retrasado el cultivo de una área del saber o especialidad. Su supuesto básico es que los factores sociales pueden acelerar o dificultar el avance, pero no intervienen en su estructura. Por contra, la sociología del conocimiento científico parte de la creencia de que éste es una construcción social y su carácter no difiere, por ejemplo, del de la estética: todo, al fin y al cabo, son modas que se aceptan o se rechazan.

La revista *Social Studies of Science* ha sido sin duda el "core journal" de la sociología del conocimiento científico, pero muchos trabajos han aparecido en revistas muy diversas de no fácil acceso a los que se interesen por el tema. Esta ha sido la causa que ha llevado a H. M. Collins a reunir en un libro algunos de los artículos más significativos de la nueva corriente. Con parecida intención han aparecido hace poco otras dos recopilaciones, debidas, una, a E. Gebhart (1981) y, otra, a B. Barnes y D. Edge (1982).

De los artículos que se han seleccionado, el de contenido más teórico y programático es el de D. Bloor, quien estudia el pensamiento de Mannheim y de Wittgenstein en relación a la influencia de los factores sociales en la construcción del saber matemático. Es en este artículo donde D. Bloor expone el que ha venido denominándose desde entonces (1973) "strong programme of the sociology of knowledge". De fuerte contenido teórico es el texto que H. Barnes y Law, apoyándose en el análisis de Imre Lakatos, dedican a la historia de la teoría del poliedro. Su principal objetivo es demostrar que el lenguaje científico no es independiente del contexto ni de las pautas culturales en la que se describe el mundo: no puede ser, en resumen, un lenguaje formalizado. El artículo debido a S. W. Woolgar también elige como tema una "ciencia dura", la física, y trata de demostrar que el descubrimiento del primer púlsar fue una idea socialmente construida.

Otros dos artículos se refieren a temas biológicos o antropológicos. Uno es el análisis que Farley y Geison dedicaron al debate que sobre la generación espontánea sostuvieron Pasteur y Pouchet en el siglo XIX. En contra de lo que hasta ahora se ha mantenido, presentando a Pasteur como un modelo de experimentador científico, objetivo y aséptico, Farley y Geison demuestran que Pasteur no contestó de manera científica a los experimentos que Pouchet hizo en los Pirineos, que de sus propios sólo presentó aquellos que favorecían su tesis, y, por fin, que Pasteur cambió su actitud respecto a la generación espontánea a medida que cambiaba el clima político. El segundo artículo es de S. Shapin y se dedica a estudiar cómo los intereses políticos, económicos y sociales influyeron en el debate que en Edimburgo tuvo lugar en torno a la frenología. Los pedagogos, mercaderes y médicos rurales fueron los principales defensores de la doctrina de Gall, mientras que las capas superiores se opusieron a esta teoría que atacaba la ortodoxia unicista, según la cual el alma no podía dividirse en partes.

Ron Westrum es el autor de otro de los artículos recogidos en la antología de Collins. Su objeto es analizar el extraño y largo camino que condujo, en el siglo XVIII, al reconocimiento de la existencia de meteoritos. Dicho reconocimiento sólo tuvo lugar, según Westrum, cuando los sabios encontraron un camino de evaluar los informes, idearon una teoría para explicarlos y recibieron impecables testimonios presenciales de su existencia.

El libro incluye un trabajo del propio recopilador, H. M. Collins, quien junto a T. J. Pinch estudió las discusiones en torno a los fenómenos parasicológicos. Estas discusiones tienen lugar tanto dentro del ámbito científico como en el extracientífico. Collins y Pinch analizan las tácticas, en ambos campos, de los que desean que la parasicología sea considerada como una ciencia y de los científicos que rechazan tal pretensión.

El último artículo lo firman D. Robbins y R. Johnston. Su objeto es demostrar las diferentes opiniones que pueden tener, en contra de lo que parece, dos grupos de científicos cuando se trata, por ejemplo, de dar informes técnicos sobre algún problema de interés público. Se estudia el caso de la distinta consideración de los niveles tóxicos de plomo entre los médicos que trabajan en industrias y los trabajadores en salud pública. También se hacen referencias a los distintos criterios psiquiátricos condicionados por la instalación profesional de los que los sostienen, y de los distintos intereses y objetivos entre los oncólogos clínicos y los que se dedican a la investigación básica.

Creo que, a pesar de que la idea básica que late tras estos estudios es sumamente interesante, los resultados son todavía muy pobres. Serán escasos los lectores que al acabar el libro salgan plenamente convencidos de que, permítaseme la caricatura, nuestras creencias en la ley de la gravedad tienen el mismo carácter que nuestros sentimien-

tos acerca del romanticismo. Pero si la sociología del conocimiento científico no ha conseguido su objetivo final, sí ha supuesto un enfoque sugestivo para cuantos se dedican a la sociología de la ciencia, a la política científica, a la epistemología y a la historia de la ciencia. El libro de H. M. Collins es un instrumento útil y cómodo para tomar contacto con esta nueva propuesta. (F. B.)

ASTROPHYSICAL COSMOLOGY. PROCEEDINGS OF THE STUDY WEEK ON COSMOLOGY AND FUNDAMENTAL PHYSICS. Academia Pontificia de Ciencias; Ciudad del Vaticano, 1982. La Academia Pontificia de Ciencias se remonta a 1603. Actualmente forman parte de ella científicos de 25 naciones, entre ellos 24 premios Nobel. Galileo, miembro de la misma, discutió su ley de caída de los cuerpos en el edificio Pío IV en el Vaticano, donde se celebró esta Semana de trabajo con la participación de 22 investigadores, entre los que se encontraban Hawking, Longair, Ostriker, Peebles, Rees, Schmidt, Silk y Weinberg, autores en la mayoría de los casos de artículos que han ido apareciendo en *Investigación y Ciencia*.

Después de los discursos de C. Chagas, presidente de la Academia, y del Papa Juan Pablo II, la obra recoge 28 trabajos: una introducción de Martin Rees, 26 estudios monográficos ordenados en 5 secciones y una conclusión de M. S. Longair. Abarcan el ancho dominio de la cosmología.

La primera sección está dedicada a la estructura del universo a gran escala. Marc Davis (Berkeley) y J. H. Oort (Leiden) estudian la distribución tridimensional de las galaxias. Davis considera los datos de las 2400 galaxias del catálogo Harvard-Smithsonian; Oort se centra en diversos supercúmulos. Las conclusiones, importantes para valorar los diversos modelos de formación de las galaxias, no son todavía definitivas. Jim Peebles (Princeton) presenta una simulación numérica sobre el mismo tema. Los grandes avances hechos hasta ahora permiten esperar que, en un futuro no lejano, pueda determinarse si primero se formaron las estructuras de mayor escala (como sostiene el modelo de la "torta" de Zeldovich) o si éstas resultaron de la agrupación de galaxias que existían con anterioridad. Por otra parte, Gustav Tammann (Basilea) presenta un trabajo en colaboración con Allan Sandage (Monte Wilson y Las Campanas) sobre los valores de la constante de Hubble y el parámetro de deceleración. Una detenida valoración de los diversos métodos les lleva a un valor de la constante de Hubble próximo a 50, que está de acuerdo con los trabajos presentados por Faber, Audouze y Lynden-Bell (este último, sobre la génesis del Grupo Local, se encuentra también en la primera sección que estamos comentando). Las conclusiones de Tammann refuerzan su posición en favor del carácter abierto de nuestro universo. Los trabajos mencionados dan clara idea del inmenso camino recorrido y de las dificultades que siguen existiendo en torno al carácter abierto o cerrado del universo y a la formación de las grandes estructuras cósmicas.

La sección segunda se dedica a la evolución de las galaxias. Sandra Faber (California) estudia el desarrollo de modelos de agrupación jerárquica, partiendo de la teoría de White-Rees sobre la formación de las galaxias. James Gunn (Princeton) expone sólidos datos en favor de la evolución de galaxias elípticas gigantes. H. van der Laan (Leiden) describe un método para identificar radiogalaxias que no requiere invertir mucho tiempo en grandes telescopios; no es la única vez en que se alude a esa dificultad práctica en estos trabajos, que necesitan obviamente una gran dedicación de personas, tiempo y de instrumentos altamente especializados, en sus observaciones. Longair insiste en la necesidad de conseguir una utilización más amplia de los grandes telescopios para poder llevar a cabo programas de largo alcance. Concluye esta sección con otro breve estudio sobre radiogalaxias, firmado por S. J. Lilly y M. S. Longair (Edimburgo).

La sección tercera, centrada en la evolución de quasars, radiogalaxias y la radiación X de fondo, comienza con un estudio de Maarten Schmidt (California), descubridor de los quasars, y Richard Green (Arizona) sobre su distribución en el espacio. Nos encontramos con la cuestión de la ausencia de quasars para corrimientos al rojo superiores a 3,5, que se agrava teniendo en cuenta que deberían encontrarse de 7 a 9 en el intervalo comprendido entre 3,5 y 4,7. Es obvio que persisten grandes dificultades para comprender la astrofísica de estos objetos. Incluso pueden existir dificultades básicas para la observación de objetos discretos en el intervalo de 5 a 1000. La naturaleza y propiedades de los quasars son estudiadas por L. Woltjer (Garsching, Munich) y G. Setti (Bolonia), quienes presentan otro trabajo acerca del origen de las radiaciones de fondo X y γ, tema en el que vuelven a considerarse los quasars. L. Z. Fang (China) desarrolla un breve estudio sobre la distribución de los corrimientos al rojo de los quasars. La sección se completa con tres ponencias sobre evolución cosmológica. La de H. van der Laan y R. A. Windhorst (Leiden) se complementa con la de M. S. Longair (Edimburgo), centradas ambas en los datos disponibles sobre radiogalaxias. Les sigue otra sobre modelos de las radiofuentes, de G. Swarup (India).

La cuarta sección comprende estudios muy diferentes bajo el título común de "nucleosíntesis primordial y el origen de las galaxias". Jean Audouze (París) expone el estado de la investigación sobre la abundancia de los elementos ligeros (deuterio, helio 3, helio 4, litio 7) y su relación con la nucleosíntesis primordial. Audouze y Longair (en la conclusión) subrayan que la abundancia del deuterio y del helio 4, en relación con la nucleosíntesis, es uno de los argumentos más fuertes en favor de las cosmologías del modelo de la gran explosión. (Longair afirma que se trata del argumento más fuerte, dadas las coincidencias entre las previsiones teóricas y los datos observados.) Sigue un amplio estudio en el que Joseph Silk (Berkeley) aborda varias posibilidades de contrastar empíricamente las teorías sobre la formación de las galaxias, tema donde el interés corre parejo con la dificultad; las contrastaciones propuestas se centran alrededor de la estructura a gran escala del universo, que apoyarían el modelo de la "torta" defendido por Silk junto con Zeldovich. Todavía hay otro trabajo, de J. P. Ostriker (Princeton), sobre la formación de las galaxias, y unas breves notas de Martin Rees sobre una posible población III pregaláctica.

Se centra la quinta sección en la relación entre la cosmología y la física de partículas. Steven Weinberg (Harvard) expone los recientes desarrollos teóricos y las aplicaciones de la física de partículas a la cosmología. Con todo lo que esas teorías tienen de conjetural, señalan direcciones en las que cabe esperar serios progresos en un futuro no muy lejano. Desde ese momento, en este trabajo y en los siguientes se abordan puntos de conocida importancia: las teorías de las interacciones electrodébiles, la no conservación de los números bariónico y leptónico, las simetrías, las teorías de la gran unificación, la posible masa de los neutrinos. De esta última cuestión habla D. W. Sciama (Oxford). Los experimentos en marcha para detectar la posible masa de los neutrinos, de resultar positivos, tendrían amplias consecuencias para la cosmología: podrían dar razón de la masa invisible de galaxias y cúmulos. Sciama expone detalladamente los di-

versos aspectos implicados, objeto también de una breve nota de Gunn. La sección acaba con un trabajo de S. W. Hawking (Cambridge) sobre las posibles condiciones iniciales del universo, y otro, más breve, de Yacob Zeldovich (Moscú) en torno al universo cerrado y el principio antrópico.

En la conclusión, Longair subraya la práctica unanimidad de los participantes acerca de las teorías de la gran explosión, señalando: "nuestra intención ha sido discutir hasta qué punto la física convencional puede dar razón de los hechos conocidos en nuestro universo observable. Debemos aceptar que hay una probabilidad finita de que este enfoque no sea correcto y de que la imagen no-convencional pueda probarse correcta". En la introducción, Martin Rees advierte que la suposición de que hubo una gran explosión "es por el momento una hipótesis, no un dogma. Parece coherente con los datos que tenemos... ofrece un buen marco para nuestras discusiones cosmológicas; explorando sus consecuencias más a fondo y sometiéndolas a contraste con todos los nuevos datos podremos decidir si debe abandonarse o si cabe desarrollarla". Este mismo rigor intelectual, que se extiende a las bases mismas de la discusión, está presente en los diversos trabajos de este volumen. La cosmología ha de afrontar problemas difíciles sobre los cuales la evidencia observacional es muy limitada y, los sucesos, verdaderamente singulares.

La obra interesará a quienes se dedican a la astrofísica y también a especialistas de materias afines. No tiene pretensiones divulgativas, ni trata cuestiones que se aparten de lo estrictamente científico. Después de cada trabajo se incluyen las discusiones y comentarios. La presentación es muy cuidada. Se incluyen muchos gráficos, diagramas y fotografías, así como abundante bibliografía sobre cada tema. La introducción de Rees y la conclusión de Longair resumen claramente los planteamientos, soluciones, problemas y perspectivas futuras. Para la realización de los trabajos se ha contado con la ayuda de la National Science Foundation, NASA, Alfred P. Sloan Foundation y Swiss National Science Foundation.

Lógicamente, los avances dependerán en buena parte de nuevos datos observacionales. En este sentido, se formulan predicciones concretas que podrán ser contrastadas. Sin excluir la posibilidad de algún descubrimiento excepcional, las mayores esperanzas se ponen en la continuación de los trabajos actuales y, desde luego, en los datos que proporcionará el telescopio espacial. Por lo que se refiere a las teorías de la gran unificación, hay que tener presente que implican una considerable extrapolación, también conceptual. A pesar de las dificultades, las voces más optimistas afirman que se dispondrá de una imagen adecuada de nuestro universo a finales de este siglo.

El interés que despiertan estas cuestiones va en aumento. En noviembre de 1983, el CERN organizó un simposio con el título "Estructura a gran escala del universo, cosmología y física fundamental", con la participación de unos 200 especialistas (entre ellos Audouze, Faber, Hawking, Sandage, Sciama y Silk, antes mencionados). Se pudo constatar una confianza creciente en las teorías de la gran unificación, tema compartido por los cosmólogos y los físicos de partículas, puesto que las temperaturas del universo primitivo son una referencia apropiada para las hipótesis de la GUT. Se siguen con gran interés los experimentos dirigidos a corroborar la desintegración del protón y la masa y los tipos de los neutrinos. En cuanto a resultados concretos, la mayor novedad respecto a la Semana del Vaticano era, obviamente, el descubrimiento de las partículas *W* y *Z* en el CERN, lo que significa un notable apoyo a la teoría de unificación de las interacciones electromagnética y débil. (M. A.)

HISTORIA DE LA EDAD DE PIEDRA, de Hermann Müller-Karpe. Editorial Gredos; Madrid, 1982. Traducción de la segunda edición alemana (1976) por A. Blanco Freijeiro. Ante la extensión y denso contenido de la obra, nos vemos obligados, en esta breve reseña, a mencionar tan sólo algunas de las múltiples cuestiones estudiadas por el autor, quien reúne en ella los capítulos IV a IX de otros dos libros suyos editados en 1966 y 1968, respectivamente, pero ahora trata el tema más en sentido histórico que arqueológico, aunque elaborando sus conclusiones fundado en los hallazgos prehistóricos.

Se inicia el estudio con la exposición de las diversas concepciones religiosas y filosóficas sobre el hombre desde la Antigüedad hasta el momento actual, afirmando que la única forma de llegar al conocimiento de los comienzos de la historia humana está en la correcta utilización de los datos arqueológicos que deben manejarse con extremado cuidado, dadas las limitaciones de su interpretación histórica.

Los condicionamientos geográficos influyen en el hombre a través de todo el Paleolítico, diferenciándose unos modos de vida de otros, según la fauna y flora de la zona en que se vive; el posible aislamiento ocasiona características raciales, siendo, tal vez, el neandertalense un tipo especializado que pudo haber coexistido con otras formas antropológicas. Pero el aislamiento no es total, pues las diversas clases de piedras utilizadas para la fabricación de herramientas y los objetos de adorno prueban la existencia de relaciones intergrupales. Así, artefactos que proceden de canteras distantes más de cien kilómetros del lugar de hallazgo y conchas marinas que llegaron a puntos situados a más de doscientos kilómetros son testimonio de ello. Los contactos serían, pues, normales y contribuirían al desarrollo de las relaciones culturales entre las gentes paleolíticas.

Las industrias microlíticas, que actualmente se encuadran en el denominado Mesolítico, las sitúa en los comienzos del Neolítico. Establece diferencias en el comportamiento de los grupos regionales, unos manteniendo las viejas tradiciones, mientras que otros adoptan las nuevas corrientes culturales, produciéndose con ello la diversidad entre los territorios costeros y los intercontinentales.

Destaca la fuerte relación entre el comportamiento guerrero y la invención de la agricultura y ganadería; éstas vinculan al hombre a un determinado territorio, constituyéndose grupos regionales que se interrelacionan por migraciones, intercambios culturales y conflictos bélicos. Buena prueba de estas relaciones nos la proporciona la cerámica impresa que, durante el Neolítico, se extiende desde el Asia Anterior por todas las costas mediterráneas.

Al estudiar el Neolítico europeo supone para Francia meridional una neolitización desde España por mediación de la "cultura monserratina", denominación que ha dejado de emplearse en los medios científicos desde hace muchos años. Ninguna otra referencia se hace al Neolítico español.

En el capítulo dedicado a la economía, describe con minuciosidad la técnica de la caza paleolítica del elefante, rinoceronte, oso, bisonte, etcétera, siendo las condiciones climáticas las que marcan las preferencias por una u otra especie. Frente a este tipo de caza, sujeta a un determinado territorio, existe la denominada "caza sujeta a una especie", ya que hubo grupos humanos que iban tras el reno en las migraciones estacionales de éste. El fuego fue básico para el desarrollo cultural y económico; pueden establecerse dos etapas,

la de conservación sin producirlo, desde los primeros tiempos de la humanidad, y la de producirlo intencionadamente, que ocurría a partir del Paleolítico Medio.

Se caracteriza la economía neolítica por la agricultura, ganadería, cerámica, nuevas técnicas en el trabajo de la piedra, etcétera, pero siguen siendo básicas la recolección y la caza, incluso en aquellos lugares donde el cultivo de la tierra y la cría de ganado se conocían, por lo que considera "fuertemente cazadora la economía de la cultura que crea la pintura rupestre levantina de España", pero situándola en tiempos neolíticos. La inseguridad en la obtención de alimentos por simple recolección origina el cultivo de cereales, cuyo inicio se encuentra en los terrenos diluviales del Eufrates y Tigris. Con la agricultura nace la ganadería, siendo los primeros animales domésticos, aparte del perro, pequeños rumiantes, toro, asno, cerdo, etcétera. Sólo a finales del neolítico se domestica el caballo.

El estudio de las diversas formas de vivienda a lo largo del Paleolítico y Neolítico ocupa otro capítulo de la obra. En él se citan los primeros asentamientos al aire libre, próximos a corrientes de agua en el Paleolítico Inferior, comenzando a utilizarse las cuevas en los inicios del Medio y siguiendo su ocupación a lo largo de todo el Paleolítico Superior y buen parte del Neolítico, en el que, a partir del período reciente, aparecen las aldeas, emplazadas en sitios de fácil defensa y protegidas por fortificaciones. La reiterada ocupación de un mismo lugar a través de los siglos originó las "colinas de poblamiento" o "tells", que en ocasiones superan los veinte metros de altura.

Al referirse a las relaciones sociales, sostiene que la conciencia, que hace sentirse al hombre con personalidad propia frente a los demás, da origen, desde un principio, a una sociedad humana que, aun con analogías en su comportamiento con los animales, no es comparable a éstos, pues aquella rebasa las necesidades de orden biológico, como lo prueban los enterramientos paleolíticos en los que el ritual es idéntico para hombres y mujeres y niños, recién nacidos incluidos.

La necesidad de defender la propiedad engendra la violencia y la guerra se convierte en factor decisivo de las relaciones humanas; pero también se mantienen relaciones culturales de diversa índole. El arte es una manifestación cultural que aparece de repente en el Paleolítico Superior, plenamente desarrollado y sin que pueda establecerse su lugar de origen, debiéndose a especialistas sostenidos por la comunidad.

Menciona cuevas españolas con pinturas paleolíticas: La Pasiega, El Castillo (en Santander, no en Asturias como se dice en el índice), La Pileta, Altamira, entre otras, dejando de citar otros conjuntos, como por ejemplo, Nerja y Tito Bustillo. Para las plaquetas pintadas y grabadas del Parpalló postula una relación estética y tipológica en todos los estratos de la cueva.

El arte rupestre levantino se pone en relación con las pinturas murales del neolítico antiguo de Çatal Hüyük (Anatolia), lo que hace "más fácil juzgar las pinturas del Levante Español en su aspecto cronológico y cultural"; esta relación no se debe a la casualidad, sino a contactos circunmediterráneos. Nosotros añadiremos que no recordamos otras representaciones de esta índole en el resto del Mediterráneo, pero sí nos acordamos de la tesis defendida durante muchos años por eminentes prehistoriadores según la cual nuestro arte levantino se relacionaba con el bosquimano, tesis que fue arrinconada hace tiempo. Debemos, por tanto, tomar con extremada cautela estas "relaciones culturales" entre Anatolia y el Levante Español en el Neolítico Antiguo, a través de las pinturas. Sobre la cronología de nuestras pinturas, afirma que las de Minateda y Val del Charco de Agua Amarga son prueba de la gran expansión del arte cuaternario pero no del inicio del levantino, del que menciona abundantes abrigos con pinturas.

Al culto y religión dedica el último capítulo de su obra. Es una larga disquisición metafísica en la que van intercalándose los datos arqueológicos que prueba cómo ya a fines del Paleolítico Inferior hay testimonios de actividades religiosas, con sacrificios de animales, depósitos de cráneos de reno, etcétera, reflejándose también en el tratamiento de los muertos, pues se hallan enterramientos, a partir del Paleolítico Medio, con ofrendas que muestran la piedad afectiva hacia el difunto y la creencia de la supervivencia después de la muerte. También se ha considerado el arte como una manifestación religiosa; sin embargo, nos queda la duda de si las pinturas son expresión de pasado, esperanza de futuro o un simple concepto genérico sin referencia a nada en concreto. Posiblemente se pretendiera perpetuar el éxito de una cacería y, por tanto, no tendrían visión de futuro.

Hay indicios de que en el Neolítico se practicó el "sacrificio fundacional"; debajo de uno de los templos de Tepe Gaura (Irak), en el estrato XIII, el enterramiento de cinco niños debe interpretarse con tal finalidad.

Según zonas y épocas (Asia Anterior, Egipto, Europa) hallamos diferentes tipos de enterramientos, los que detalla minuciosamente y de los que nosotros destacamos la costumbre muy extendida ya en el Neolítico Antiguo y Medio del Asia Anterior de sepultar a los muertos bajo el piso de las habitaciones, costumbre que volveremos a encontrar en nuestra Edad del Bronce, y lo mismo sucede con los enterramientos en "pithoi". La incineración, que aparece por primera vez en el estrato XII de Tepe Gaura, desempeñará un gran papel a partir del Neolítico Reciente europeo.

Cerramos esta reseña insistiendo en los muchos puntos de vista del mayor interés que, por la brevedad de este comentario, han quedado sin referenciarse. Y finalizamos con unas muy breves observaciones. En primer lugar, las referencias a nuestra Península son esporádicas, a excepción de cuando se habla de arte, pues en todo lo demás parece no existir la Península Ibérica. En la bibliografía sólo aparecen tres autores españoles y ninguno portugués, y en cuanto a yacimientos se mencionan 29 españoles, todos ellos con arte rupestre y uno portugués, de pasada, al hablar de concheros. En la parte gráfica, de unas 525 figuras, sólo 25 son españolas, y exclusivamente de arte.

Así, pues, en un libro dedicado al lector español, la Península Ibérica es la gran olvidada. Para subsanar este vacío tal vez hubiera sido oportuno un apéndice resumiendo el estado actual del Paleolítico y Neolítico peninsulares.

Y en segundo lugar, lamentar que un libro de importante contenido y esmerada presentación ofrezca una parte gráfica con treinta y tres láminas de dibujos de tan reducido tamaño y confusa disposición que, prácticamente, son inservibles. (D. F.)

THE MATHEMATICAL EXPERIENCE, por Philip J. Davis y Reuben Hersh. Birkhäuser; Basel, 1981. La aparición de este libro constituyó un rápido éxito en Estados Unidos, hasta el punto de convertirlo en uno de los más leídos y aplaudidos dentro de la comunidad matemática y entre todos los interesados por entender desde dentro el quehacer matemático. El fenómeno es interesante, pues viene a representar una eclosión de libertad haciendo aflorar una corriente más o menos subterránea de ideas y sentimientos que pujaban desde hace tiempo por salir a la superficie.

Por fin matemáticos contemporáneos

de prestigio, sin finalidades polémicas, sin prisas, con toda paz, como recreándose en ello, con una buena información y capacidad de expresión, se deciden a pensar en alto, como para todos, sobre las vivencias que impregnan la actividad de cuantos se dedican al mundo de las matemáticas.

En realidad, el pensamiento profundo sobre la naturaleza de la matemática había comenzado a cambiar de aspecto hace unos cuantos años, especialmente con la publicación en forma de libro, en 1976, de *Proofs and Refutations*, de Imre Lakatos, pero estos cambios no habían llegado aún a calar en la gran población de matemáticos activos. Con Lakatos, la filosofía de la matemática deja ya de identificarse con la inmersión lógica en sus fundamentos, para poner los ojos en la extraña vida propia de las ideas matemáticas tan relacionadas en su origen y transformación con la propia historia individual y social del hombre matemático. Davis y Hersh avanzan en esta línea tratando de poner en claro el sentido existencial de la actividad del matemático contemporáneo, desde una infinidad de perspectivas, con observaciones acertadas que resuenan inmediatamente en su experiencia cotidiana. El profesional no puede menos de sonreír pensando en personajes muy reales de su propio mundo al contemplar la descripción del *matemático ideal* (p. 34) enfrascado en el estudio de sus *hipercubos no riemannianos*, esotérico objeto de éxtasis de su propia subcomunidad. O de identificarse, en su propia ambigüedad (platonismo, formalismo), a la hora de justificar lógicamente su actividad, al describir los apuros filosóficos del matemático activo (p. 321). Y de contemplarse a sí mismo con las vívidas descripciones del trabajo en clase, tratando de dejar libre el paso a la verdad matemática en el mecanismo de comprensión de sus alumnos (p. 274).

The Mathematical Experience tiene varias características llamativas que posiblemente explican su éxito. El libro ofrece la estructura del mosaico, con breves trazos de muchos temas distintos. Su exploración no es muy sistemática y ningún tema se persigue prolongadamente, ni en extensión ni en profundidad. Esto origina en el lector el deseo de más información para lo cual puede encontrar ayuda en las numerosas referencias bien escogidas que encuentra al final de cada sección. El tinte de todas las exposiciones es extraordinariamente ecléctico, de tal forma que al terminar una sección el lector se pregunta si los autores tienen algún partido tomado en las posibles opciones.

El texto está distribuido en seis grandes capítulos: 1. El paisaje matemático, 2. Variedades de experiencia matemática, 3. Cuestiones externas, 4. Cuestiones internas, 5. Fragmentos escogidos de matemáticas, 6. Enseñanza y aprendizaje. 7. De la certeza a la falibilidad, 8. La realidad matemática. Cada capítulo se divide en secciones más bien breves (unas cuatro o cinco páginas) con claros encabezamientos, lo que facilita una lectura bien estructurada. Para comentar algunos fragmentos del contenido de la obra he escogido dos de los capítulos que, a mi parecer, resultan más atrayentes y mejor elaborados, el capítulo 4 y el 7. El capítulo 4, *Inner Issues*, contiene un recorrido panorámico del significado de los distintos ingredientes que vienen a constituir lo más específico del quehacer matemático. El uso del símbolo es tal vez el más externo de ellos y lo que salta a la vista a cualquiera que ojee un texto antiguo o moderno. Los procesos de pensamiento que conducen a la creación matemática son estudiados a continuación: abstracción, generalización, formalización, indicando el lugar natural que a cada uno le corresponde con ejemplos de la literatura matemática actual. Los productos de estos procesos son analizados a continuación: los objetos y estructuras matemáticas y la demostración. Se estudian algunos de los objetos de la intuición prematemática sobre los que los procesos anteriores encuentran el estímulo más fuerte para su ejercicio: el infinito, la intuición espacial y el azar. Seguidamente se examinan algunos aspectos más sutiles de la creación relacionados con el sentimiento estético, el orden intelectual, el presentimiento de ciertas verdades como enigmas aún no aclarados, la percepción de la unidad y armonía en la diversidad,...

El capítulo 7, *From Certainty to Fallibility*, contiene tal vez los aspectos más representativos del cambio de mentalidad que se viene operando entre los matemáticos en la forma de considerar su propia ciencia. Comienza con una breve descripción de las opciones platónica, formalista, constructivista, que al matemático activo de hoy se le ofrecen para explicar su propia actividad, señalando a continuación como opinión bastante generalizada que "el matemático activo típico es platónico en días laborables y formalista los domingos. Es decir, cuando está haciendo matemáticas está convencido de que está tratando con una realidad objetiva cuyas propiedades está intentando determinar. Pero luego, cuando se le demanda una explicación filosófica de esta realidad, encuentra lo más fácil fingir que no cree en ella después de todo".

Después de señalar el camino que la reflexión epistemológica sobre la naturaleza del conocimiento matemático ha seguido de forma más o menos explícita desde Euclides a través de Platón, los filósofos racionalistas, los empiristas y Kant, los autores pasan a explicar los vaivenes de la crisis de fundamentos que tanto influjo ha ejercido sobre la filosofía de la matemática desde el comienzo de nuestro siglo. Los intentos de formalización de Peano, Frege, Russell y Whitehead, el ataque constructivista de Brouwer y Weyl y los intentos conservacionistas de Hilbert, tratando de demostrar por métodos finitistas la consistencia de la matemática, fueron los principales jalones de este período que desembocó en 1930 en los teoremas de incompletitud de Gödel. Todo ello dejó en el espíritu de los matemáticos el poso de una actitud prevalentemente formalista a la hora de explicitar su pensamiento fundacional sobre la matemática.

Pero donde los autores se detienen con más complacencia es en la sección final del capítulo dedicada a Lakatos y la filosofía de la dubitabilidad (345-359). Lakatos propugna el pasar la mirada de la matemática formal a la informal, es decir, a la matemática vivida por los matemáticos creadores y por los estudiantes de matemáticas. Es esta diferente contemplación la que nos permitirá salir del marasmo en que la filosofía matemática ha sido introducida en la búsqueda de los fundamentos. La mezcla de certeza y duda que se puede alcanzar en la actividad normal del matemático hay que analizarla en su contexto histórico, social, vivencial,... Davis y Hersh defienden la postura de Lakatos incluso en algunas de sus afirmaciones más radicales y controvertidas, como la de que, a fin de revisar la filosofía infalibilista de la matemática, "habría que abandonar la idea de que nuestra intuición inferencial deductiva es infalible". El mecanismo de deducción de la matemática real, el que funciona dentro y a través de la comunidad matemática del momento, depende, en muchas ocasiones, de la aceptación de un segmento reducido de esa comunidad que incluso trabaja sobre una parcela matemática de modo fragmentario, apoyándose unos en el trabajo de los otros, sin haber contrastado sus resultados, o peor aún habiendo delegado ciertas porciones de tal trabajo al mecanismo del computador. (M. G.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

GENESIS DE LOS PULSARES

FRONTIERS OF ASTROPHYSICS. Dirigido por E. H. Avrett. Harvard University Press; 1976.

PULSARS. R. N. Manchester y J. H. Taylor. Freeman and Company; 1977.

STARS, THEIR BIRTH, LIFE AND DEATH. I. S. Shklovskii. Freeman and Company; 1978.

UN ABISMO DINAMICO

THE ATMOSPHERE AND THE OCEAN. R. W. Stewart en *Scientific American*, vol. 221, n.º 3, págs. 76-86; septiembre, 1969.

THE FACE OF THE DEEP. Bruce C. Heezen y Charles D. Hollister. Oxford University Press, 1971.

DEEP CIRCULATION OF THE WORLD OCEAN. Bruce A. Warren en *Evolution of Physical Oceanography: Scientific Surveys in Honor of Henry Stommel*, dirigido por Bruce A. Warren y Carl Wunsch. The MIT Press, 1981.

THE ENVIRONMENT OF THE DEEP SEA. Dirigido por W. G. Ernst y J. G. Morin. Prentice-Hall, Inc., 1982.

CONTROL GENETICO DE UN COMPORTAMIENTO INNATO

A FAMILY OF GENES THAT CODES FOR ELH, A NEUROPEPTIDE ELICITING A STEREOTYPED PATTERN OF BEHAVIOR IN APLYSIA. Richard H. Scheller, James F. Jackson, Linda Beth McAllister, James H. Schwartz, Eric R. Kandel y Richard Axel en *Cell*, vol. 28, n.º 4, págs. 707-719; abril, 1982.

A SINGLE GENE ENCODES MULTIPLE NEUROPEPTIDES MEDIATING A STEREOTYPED BEHAVIOR. Richard H. Scheller, James F. Jackson, Linda B. McAllister, Barry S. Rothman, Earl Mayeri y Richard Axel en *Cell*, vol. 32, n.º 1, págs. 7-22; enero, 1983.

IN SITU HYBRIDIZATION TO STUDY THE ORIGIN AND FATE OF IDENTIFIED NEURONS. Linda B. McAllister, Richard H. Scheller, Eric R. Kandel y Richard Axel en *Science*, vol. 222, n.º 4625, págs. 800-808; 18 de noviembre de 1983.

ORIGEN DE HOMINOIDEOS Y HOMINIDOS

CURRENT ARGUMENT ON EARLY MAN. Dirigido por L.-K. Konigsson. Pergamon Press, 1980.

NEW INTERPRETATION OF APE AND HUMAN ANCESTRY. Dirigido por R. L. Ciochon y R. S. Corruccini. Plenum Press, 1983.

MATERIA EXCITONICA

ELECTRON-HOLE CONDENSATION IN SEMICONDUCTORS. Carson D. Jeffries en *Science*, vol. 189, n.º 4207, págs. 955-964; 19 de septiembre de 1975.

THE ELECTRON-HOLE LIQUID IN SEMICONDUCTORS: EXPERIMENTAL ASPECTS. J. C. Hensel, T. G. Phillips y G. A. Thomas en *Solid State Physics*, vol. 32, págs. 88-314; 1977.

THE ELECTRON-HOLE LIQUID IN SEMICONDUCTORS: THEORETICAL ASPECTS. T. M. Rice en *Solid State Physics*, vol. 32, págs. 1-86; 1977.

THERMODYNAMICS OF EXCITONS. J. P. Wolfe en *Physics Today*, vol. 35, n.º 12, págs. 46-54; marzo, 1982.

SONIDOS MUSCULARES

A GUIDED TOUR OF THE FAST FOURIER TRANSFORM. G. D. Berglund en *IEEE Spectrum*, vol. 6, n.º 7, págs. 41-52; julio, 1969.

LOW FREQUENCY SOUNDS FROM SUSTAINED CONTRACTION OF HUMAN SKELETAL MUSCLE. Gerald Oster y Joshua S. Jaffe en *Biophysical Journal*, vol. 30, n.º 1, págs. 119-127; abril, 1980.

MUSCLES AND THEIR NEURAL CONTROL. Geoffrey Hoyle. John Wiley & Sons, Inc., 1983.

ADAPTABILIDAD DEL RATON DOMESTICO

ADAPTATION OF MICE TO COLD. S. A. Barnet en *Biological Reviews*, vol. 40, n.º 1, págs. 5-51; febrero, 1965.

SOCIAL RANK IN HOUSE MICE: DIFFERENTIATION BY ULTRAVIOLET VISUALIZATION OF URINARY MARKING PATTERNS. Claude Desjardins, J. A. Maruniak y F. H. Bronson en *Science*, vol. 182, n.º 4115, págs. 939-941; 30 de noviembre de 1973.

THE REPRODUCTIVE ECOLOGY OF THE HOUSE MOUSE. F. H. Bronson en *The Quarterly Review of Biology*, vol. 54, n.º 3, págs. 265-299; septiembre, 1979.

BIOLOGY OF THE HOUSE MOUSE: THE PROCEEDINGS OF A SYMPOSIUM HELD AT THE ZOOLOGICAL SOCIETY OF LONDON ON 22 AND 23 NOVEMBER 1979. Dirigido por R. J. Berry, Academic Press, 1981.

FLORENCE NIGHTINGALE

NOTES ON NURSING: WHAT IT IS, AND WHAT IT IS NOT. Florence Nightingale. Harrison & Sons, 1859.

THE LIFE OF FLORENCE NIGHTINGALE. Sir Edward Cook. Macmillan and Co., 1913.

STUDIES IN THE HISTORY OF STATISTICAL METHOD, WITH SPECIAL REFERENCE TO CERTAIN EDUCATIONAL PROBLEMS. Helen M. Walker. The Williams & Wilkins Company, 1929.

VICTORIAN SOCIAL MEDICINE: THE IDEAS AND METHODS OF WILLIAM FARR. John M. Eyler. The Johns Hopkins University Press, 1979.

JUEGOS DE ORDENADOR

PHYSICS AND COMPUTATION. Tommaso Toffoli in *International Journal of Theoretical Physics*, vol. 21, n.º 3/4, págs. 165-175; abril, 1982.

STATISTICAL MECHANICS OF CELLULAR AUTOMATA. Stephen Wolfram en *Reviews of Modern Physics*, vol. 55, n.º 3, págs. 601-644; julio, 1983.

CELLULAR AUTOMATA. Stephen Wolfram en *Los Alamos Science*, págs. 2-21; otoño, 1983.

DOING PHYSICS WITH MICROCOMPUTERS. Per Bak en *Physics Today*, vol. 36, n.º 12, págs. 25-28; diciembre, 1983.

WHEELS, LIFE, AND OTHER MATHEMATICAL AMUSEMENTS. Martin Gardner. W. H. Freeman and Company, 1984.

CELLULAR AUTOMATA: PROCEEDINGS OF AN INTERDISCIPLINARY WORKSHOP. Dirigido por Stephen Wolfram, J. Doyne Farmer y Tommaso Toffoli, en *Physica D*, vol. 10D, n.os 1 y 2; enero, 1984.

TALLER Y LABORATORIO

IMAGING OF UNDERWATER OBJECTS. Lawrence E. Kinsler en *American Journal of Physics*, vol. 13, n.º 4; págs. 255-257; agosto, 1945.

AT THE EDGE OF THE WINDOW. Robert Harmon y John Cline en *Road and Reel*, n.º 7, págs. 41-45; marzo/abril, 1980.